



# UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

## TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Impresora 3D tipo SCARA

Autor/es

MIGUEL RUIZ MAYAYO

Director/es

ALPHA VERÓNICA PERNÍA ESPINOZA

Facultad

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Departamento

INGENIERÍA MECÁNICA

Curso académico

2018-19



***Impresora 3D tipo SCARA***, de MIGUEL RUIZ MAYAYO  
(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative  
Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.  
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los  
titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD  
DE LA RIOJA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería Mecánica

**CURSO:** 2018/2019

**CONVOCATORIA:** JULIO

**TÍTULO:**

**Impresora 3D tipo SCARA**

**AUTOR:** Miguel Ruiz Mayayo

**DIRECTOR/ES:** Alpha Pernía Espinoza

**DEPARTAMENTO:** Ingeniería Mecánica



## RESUMEN DEL PROYECTO

El presente trabajo es sobre la fabricación, montaje y calibración de la impresora 3D RepRap Morgan y, además, trata de ser una guía detallada para facilitar a cualquier persona interesada en la fabricación de su propia impresora 3D autorreplicante (RepRap), la consecución de sus objetivos.

El modelo elegido (RepRap Morgan) es bastante peculiar, vistoso e interesante desde un punto de vista técnico, para usarlo con fines académicos en colegios o centros de formación y tiene los mecanismos concentrados en un área reducido; pero requiere de una inversión de tiempo considerable para imprimir y montar todas las piezas; por lo que, de requerirse un montaje rápido, quizás sea más oportuno escoger otro modelo de impresora, a poder ser de tipo cartesiana. No obstante, aunque el lector eligiera otra impresora diferente a la RepRap Morgan, se puede decir que esta guía seguiría siendo de gran utilidad, ya que se explican muchos conceptos introductorios generales, así como aspectos muy concretos, por ejemplo, del firmware (Marlin), pero aplicables casi a cualquier tipo de impresora.

A grandes rasgos, habría que destacar en el documento una primera parte llamada “Estado del arte”, donde se instruye al lector sobre los principales conocimientos teóricos generales, que servirán como introducción al mundo de la impresión 3D. A continuación, otra parte llamada “Impresora 3D RepRap Morgan”, donde se habla más específicamente sobre las características del modelo de impresora de este trabajo y se enseña al lector el proceso para imprimir<sup>1</sup> las piezas que constituirán la máquina; se detalla el montaje de la estructura y las conexiones electrónicas, así como un apartado dedicado al firmware, en el que se especifican las líneas de código que se deben cambiar en el Marlin para que la impresora funcione según sea requerido. Por último, cabe destacar un apartado llamado “Estudios realizados sobre la impresora 3D RepRap Morgan”, en el que se realizan estudios sobre la impresora en áreas como la cinemática (directa e inversa), tensión y desplazamiento en piezas críticas mediante análisis de elementos finitos, etc.

---

<sup>1</sup> Si no se dispone de una impresora 3D inicial con la que fabricar las partes impresas integrantes en la estructura de la nueva máquina a construir, se puede adquirir en internet un kit, en el cual vendrán las piezas necesarias para montar la impresora. Estos kits se venden para un gran número de impresoras 3D, incluido el modelo RepRap Morgan, en el cual está centrado este trabajo.



## PROJECT ABSTRACT

The main objective of this work is building and assembling of the 3D printer RepRap Morgan and, besides, tries to be a detailed guide to ease anyone interested in building an own RepRap Morgan or whatever type of 3D printer.

The RepRap Morgan kind of printer is not very usual (it is not cartesian configuration) and it is very attractive from an engineering point of view to use it for academic purposes, but it requires of a substantial amount of time to print and assemble all the pieces; thus, it is advised that, in case of not having so much time, it is more recommended to choose another kind of 3D printer, as for example, cartesian printer. However, even if the reader chooses another 3D printer different of RepRap Morgan, this document will continue being useful for some parts as introduction to 3D printing in general and, also, for some specific points as the firmware (Marlin) because there are points which are similar for all 3D printers.

In this document, it is possible to distinguish parts very differentiated. Firstly, a part focused on the state of the art, where the reader can find all the main theoretical general knowledges about 3D printing. Then, a second part in which the main target is, particularly, the RepRap Morgan 3D printer. In this part there are commented the main features of this printer, the way to print<sup>2</sup> the replicant pieces, the assembly of the structure, the electronic conexions and, also, a headland dedicated to the firmware, in which the lines of the Marlin code are detailed and explained. Lastly, there is a part of this document in which there are carried out some studies about the RepRap Morgan. These studies are about fields as kinematics (inverse and forward), determination of the stress and strain of some critical pieces of the printer, by mean of Finit Element Analysis, etc.

---

<sup>2</sup> If it is not possible to dispose of a 3D printer in order to fabricate the printed parts that integrate the RepRap Morgan printer structure, it is possible to acquire on the internet a kit, in which there will be all the pieces needed to assembly the printer. These kits are sold for different 3D printer models, included the ReRap Morgan, in which this project is focused.







*Me gustaría agradecer a Sergio Peciña, cofundador del área UR-Maker de la Universidad de La Rioja, por su amplio conocimiento en el mundo de la impresión 3D, del que tanto he aprendido, así como a Julio, por la ayuda y las largas horas en el taller.*

*Quisiera agradecer también a mi tutora Alpha Pernía, por su disponibilidad, ayuda y vocación en la docencia, orientando ésta a casos prácticos y a la repercusión en la sociedad.*

*Por último, agradecer a mi familia y seres queridos, por haber estado presentes siempre.*



## Índice

1	Introducción .....	19
2	Objeto .....	20
3	Estado del arte.....	21
3.1	Introducción a la impresión 3D.....	21
3.2	Métodos de prototipado rápido .....	25
3.3	Configuraciones de un robot .....	32
3.3.1	Tipos de impresora 3D según su estructura/configuración .....	38
3.4	Proyecto RepRap.....	44
3.5	Componentes principales en una impresora 3D .....	45
3.5.1	Extrusor y Hotend.....	45
3.5.2	Motor paso a paso.....	49
3.5.3	Cama caliente .....	51
3.5.4	Termistor .....	51
3.5.5	Final de carrera .....	52
4	Impresora 3D RepRap Morgan .....	53
4.1	Introducción.....	53
4.1.1	Diseño y autor.....	53
4.1.2	Evolución .....	54
4.1.3	Características y funcionamiento general .....	56
4.1.4	Modificaciones respecto al diseño original y piezas complementarias .....	58
4.1.5	Ventajas y desventajas de la impresora RepRap Morgan .....	60
4.2	Lista de materiales .....	62
4.3	Procedimiento para imprimir las piezas replicables.....	62
4.4	Montaje Hardware.....	67

4.4.1	Montaje plataforma de impresión .....	67
4.4.2	Montaje sistema de empuje MK8 Bowden .....	73
4.4.3	Montaje Hotend E3D V6.....	75
4.4.4	Montaje brazos.....	81
4.4.5	Bases superior e inferior de la estructura .....	86
4.4.6	Soportes de motores .....	88
4.4.7	Montaje poleas.....	90
4.4.8	Montaje final estructura.....	93
4.5	Conexiones y electrónica .....	96
4.5.1	Fuente de alimentación.....	96
4.5.2	Interruptor (con toma de corriente) .....	97
4.5.3	Relé cama caliente.....	101
4.5.4	Termistores.....	103
4.5.5	Placa Arduino.....	104
4.5.6	Pantalla LCD.....	107
4.5.7	Ventilador placa Arduino.....	108
4.5.8	Finales de carrera (Endstops) .....	109
4.6	Firmware.....	114
4.7	Presupuesto .....	117
4.8	Planos.....	118
5	Estudios realizados sobre la impresora 3D RepRap Morgan .....	119
5.1	Estudio cinemático.....	119
5.1.1	Introducción .....	119
5.1.2	Cinemática Directa mediante Software RoboAnalyzer .....	120
5.1.3	Cinemática Inversa mediante Software RoboAnalyzer .....	124

5.1.4	Cinemática inversa por método geométrico.....	126
5.2	Cálculo de tolerancia dimensional del soporte exterior rodamiento para resistir esfuerzos radiales del acople .....	129
5.3	Análisis por elementos finitos.....	132
5.3.1	Estudio de la configuración de los brazos .....	132
5.3.2	Estudio de los brazos con un material alternativo .....	139
6	Conclusiones.....	142
7	Futuras líneas de trabajo .....	143
8	Bibliografía.....	144
9	Softwares y programas utilizados .....	147
	ANEXOS.....	148
	ANEXO A: Lista de materiales .....	149
	Piezas impresas.....	149
	Tornillería y otros .....	150
	Componentes y electrónica.....	151
	ANEXO B: Presupuesto .....	153
	Piezas impresas.....	153
	Tornillería y otros .....	153
	Componentes y electrónica.....	153
	Resumen presupuesto.....	154
	ANEXO C: Planos.....	155

## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1 Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS). 2015. "JUDITH, juego de enseñanza matemática para estudiantes con discapacidad visual" Recuperado de: <a href="https://bit.ly/31wKyQQ">https://bit.ly/31wKyQQ</a></i>	22
<i>Ilustración 2 Prótesis impresa en 3D (Fuente: Joelfrax. 2017. Cambiando una vida: prótesis con impresiones en 3D. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2KNQb7i">https://bit.ly/2KNQb7i</a>)</i>	23
<i>Ilustración 3 Construcción de una casa mediante impresión 3Dn (Fuente: Apis Cor. "Robotics in construction". Recuperado de: <a href="https://www.apis-cor.com/">https://www.apis-cor.com/</a>)</i>	23
<i>Ilustración 4 Ejemplo de impresora FDM (Fuente: SIMPLE 3D. "Original Prusa i3 MK3s". Recuperado de <a href="https://simple3d.com.ar/producto/original-prusa-mk3/">https://simple3d.com.ar/producto/original-prusa-mk3/</a>)</i>	25
<i>Ilustración 5 Esquema impresión FDM (Fuente: Recuperado de <a href="https://www.materialise.com">https://www.materialise.com</a>)</i>	26
<i>Ilustración 6 Fabricación por haz de electrones (Fuente: Karen M. Brown Taminger, Robert A. Hafley. Publicado en 2006. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/31IOF26">https://bit.ly/31IOF26</a>)</i>	27
<i>Ilustración 7 Funcionamiento SLS (Fuente: The Technology House. (s.f.) Selective Laser Sintering (SLS) Recuperado de: <a href="https://www.tth.com/3d-printing/sls-prototyping/">https://www.tth.com/3d-printing/sls-prototyping/</a>)</i>	28
<i>Ilustración 8 Funcionamiento estereolitografía (Fuente: PRINTSPACE3D. (s.f.). Recuperado de: <a href="https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/stereolithography_illustration-2/">https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/stereolithography_illustration-2/</a>)</i>	30
<i>Ilustración 9 Clasificación de las configuraciones de un robot</i>	33
<i>Ilustración 10 Configuración cartesiana (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2WN70Xm">https://bit.ly/2WN70Xm</a>)</i>	34
<i>Ilustración 11 Configuración cilíndrica (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2WN70Xm">https://bit.ly/2WN70Xm</a>)</i>	34
<i>Ilustración 12 Configuración esférica o polar (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2WN70Xm">https://bit.ly/2WN70Xm</a>)</i>	35
<i>Ilustración 13 Configuración angular o antropomórfica, brazo articulado. (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2WN70Xm">https://bit.ly/2WN70Xm</a>)</i>	35
<i>Ilustración 14 Configuración SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm) (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2WN70Xm">https://bit.ly/2WN70Xm</a>)</i>	36
<i>Ilustración 15 Configuración SCARA de 4 grados de libertad (Fuente: Perdomo, J.F., Ramírez, M.A., Ramírez, H.M. &amp; Rodríguez, C. (s.f.), Universidad Nacional Autónoma de México, "Robot SCARA de 4 Grados de Libertad con Efecto Mecánico")</i>	36
<i>Ilustración 16 Robot paralelo plano, estructura micabo-e (Fuente:Schöttler, K., Raatz, A., &amp; Hesselbach, J., (s.f.), "Size-adapted Parallel and Hybrid Parallel Robots for Sensor Guided Micro Assembly")</i>	37
<i>Ilustración 17 Plataforma de Stewart-Gough (Fuente: Park, F.C., (s.f.) Robotics Laboratory, Seoul National University. "Parallel Robots")</i>	38
<i>Ilustración 18 Ejemplo de Impresora 3D Cartesiana. Modelo Anet A8. (Fuente: Bang Good. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2WPbInf">https://bit.ly/2WPbInf</a>)</i>	39

Ilustración 19 Ejemplo de impresora 3D tipo Delta. Modelo: Rostock (Fuente: LoveLogo. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2XkOaWU">https://bit.ly/2XkOaWU</a> )	40
Ilustración 20 Esquema del funcionamiento de una impresora 3D tipo Core XY. (Fuente: Hajjar, G., (2018). "Design and construction of a photoplotter". Recuperado de: <a href="https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1222421/FULLTEXT01.pdf">https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1222421/FULLTEXT01.pdf</a> )	41
Ilustración 21 Ejemplo de impresora 3D Polar (Fuente: Flynt, J., (2019). 3DINSIDER. "Cartesian, Delta, and Polar 3D Printers: What are They and What's the Difference?" Recuperado de: <a href="https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/">https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/</a> )	42
Ilustración 22 Ejemplo impresora 3D configuración SCARA. Modelo: RepRap HELIOS (Fuente: Hackaday.io. Recuperado de: <a href="https://hackaday.io/project/21355-reprap-helios">https://hackaday.io/project/21355-reprap-helios</a> )	42
Ilustración 23 Brazos de la Impresora RepRap Morgan tiene una configuración de SCARA paralela (Fuente: Les imprimantes 3d. (2013). "Morgan, une imprimante 3D à moins de 100€!" Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2XbDha1">https://bit.ly/2XbDha1</a> )	43
Ilustración 24 Impresora 3D RepRap. Modelo Darwin. (Fuente: Proyecto RepRap. Recuperado de: <a href="https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_RepRap">https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_RepRap</a> )	44
Ilustración 25 Extrusor / Sistema de empuje. Modelo: MK8 Bowden	45
Ilustración 26 Partes del Hoten. Modelo: V6. (Fuente: THE MAKER 3DP. (2015). "Todo sobre mi V6 hotend". Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2XiSOVs">https://bit.ly/2XiSOVs</a> )	47
Ilustración 27 Sistema de Extrusión Directa (Fuente: 3D FILS. (2018). "Extrusión directa vs extrusión bowden". Recuperado de: <a href="https://www.3dfils.com/de/blog/18_directaobowden">https://www.3dfils.com/de/blog/18_directaobowden</a> )	48
Ilustración 28 Sistema de Extrusión Bowden (Fuente: 3D FILS. (2018). "Extrusión directa vs extrusión bowden". Recuperado de: <a href="https://www.3dfils.com/de/blog/18_directaobowden">https://www.3dfils.com/de/blog/18_directaobowden</a> )	48
Ilustración 29 Motor paso a paso. Modelo: NEMA 17 17hs2408 0.6 <sup>a</sup> . (Fuente: AFEL. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2RnL92x">https://bit.ly/2RnL92x</a> )	49
Ilustración 30 Esquema de motor paso a paso tipo bipolar (Fuente:Loureiro, J., StaticBoards. "La guía definitiva para comprar los mejores motores paso a paso". Recuperado de: <a href="https://www.staticboards.es/blog/motores-paso-paso/">https://www.staticboards.es/blog/motores-paso-paso/</a> )	50
Ilustración 31 Cama caliente / Heatbed (Fuente: <a href="https://bit.ly/2Xn4jv8">https://bit.ly/2Xn4jv8</a> )	51
Ilustración 32 Quentin Harley, diseñador de la impresora 3D RepRap Morgan (Fuente: <a href="http://www.morgan3dp.com/">http://www.morgan3dp.com/</a> )	53
Ilustración 33 Morgan v1 (Fuente: <a href="https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan">https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan</a> )	54
Ilustración 34 Morgan Pro (Fuente: <a href="https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan">https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan</a> )	54
Ilustración 35 Morgan Mega (Fuente: <a href="https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan">https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan</a> )	55
Ilustración 36 Morgan Pro 2 (Fuente: <a href="https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan">https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan</a> )	55
Ilustración 37 Impresora RepRap Morgan fabricada durante este proyecto	56
Ilustración 38 Poleas y brazos unidas	56
Ilustración 39 Brazos de la configuración SCARA paralela	56

<i>Ilustración 40 Poleas y correas RepRap Morgan</i>	57
<i>Ilustración 41 Modificación soporte pequeño motor</i>	59
<i>Ilustración 42 Modificación en el soporte husillo plataforma impresión</i>	59
<i>Ilustración 43 Visualización al abrir el Cura</i>	64
<i>Ilustración 44 Ejemplo piezas a imprimir</i>	64
<i>Ilustración 45 Parámetros 1 Cura</i>	65
<i>Ilustración 46 Parámetros 2 Cura</i>	65
<i>Ilustración 47 Parámetros 3 Cura</i>	66
<i>Ilustración 48 Preparar y guardar en Cura</i>	66
<i>Ilustración 49 Piezas plataforma impresión</i>	67
<i>Ilustración 50 Colocación rodamientos Lm8uu en soporte cama caliente</i>	68
<i>Ilustración 51 Montaje soporte cama caliente</i>	68
<i>Ilustración 52 Soporte husillo plataforma impresión</i>	69
<i>Ilustración 53 Fijación atornillado husillo y soporte plataforma de impresión</i>	69
<i>Ilustración 54 Montaje plataforma de impresión</i>	70
<i>Ilustración 55 Placas de aluminio cortadas con plegadora (222x222x3)</i>	70
<i>Ilustración 56 Placa de aluminio inferior cortada para aligerar peso</i>	71
<i>Ilustración 57 Apoyos fijados a placa de aluminio inferior</i>	71
<i>Ilustración 58 Placa de aluminio inferior sobre plataforma de impresión</i>	72
<i>Ilustración 59 Heatbed pegado en la placa de aluminio superior</i>	72
<i>Ilustración 60 Placas de aluminio unidas mediante sistema de muelles</i>	73
<i>Ilustración 61 Componentes sistema de empuje MK8 Bowden</i>	74
<i>Ilustración 62 Montaje sistema de empuje MK8 Bowden</i>	75
<i>Ilustración 63 Boquilla y bloque calentador del Hotend</i>	75
<i>Ilustración 64 Atornillado de boquilla y bloque calentador</i>	76
<i>Ilustración 65 Atornillado del disipador de calor</i>	76
<i>Ilustración 66 Piezas unión termistor del Hotend</i>	76
<i>Ilustración 67 Inserción del termistor en el bloque calentador</i>	77
<i>Ilustración 68 Fijación del termistor mediante tornillo prisionero M3</i>	77
<i>Ilustración 69 Comprobación del cartucho calentador mediante multímetro</i>	77
<i>Ilustración 70 Componentes montaje cartucho calentador (Heater Cartridge)</i>	78
<i>Ilustración 71 Inserción cartucho calentador</i>	78
<i>Ilustración 72 Atornillado del M3x10 mm</i>	78
<i>Ilustración 73 Unión del disipador de calor al Hotend</i>	79
<i>Ilustración 74 Inserción de la corona unión con tubo PTFE</i>	79
<i>Ilustración 75 Montaje ventilador del Hotend</i>	80
<i>Ilustración 76 Atornillado parcial de ventilador</i>	80



<i>Ilustración 77 Montaje terminado del ventilador del Hotend</i>	80
<i>Ilustración 78 Montaje del ventilador sobre el disipador de calor</i>	81
<i>Ilustración 79 Montaje brazo (arm PSI)</i>	81
<i>Ilustración 80 Esquema montaje brazo (arm PSI)</i>	82
<i>Ilustración 81 Ejemplo de rodamientos metidos y tuercas embutidas</i>	83
<i>Ilustración 82 Montaje finalizado brazo (arm PSI)</i>	83
<i>Ilustración 83 Esquema montaje brazo (arm Theta)</i>	84
<i>Ilustración 84 Brazo vista frontal (arm Theta)</i>	85
<i>Ilustración 85 Brazo vista en planta (arm Theta)</i>	85
<i>Ilustración 86 Los dos brazos unidos</i>	86
<i>Ilustración 87 Aclaración base inferior madera MDF</i>	87
<i>Ilustración 88 Componentes montaje soporte bajo motor</i>	88
<i>Ilustración 89 Motor atornillado a soporte</i>	88
<i>Ilustración 90 Montaje finalizado motor paso a paso en soporte bajo</i>	89
<i>Ilustración 91 Montaje de soportes alto y bajo para motor paso a paso</i>	89
<i>Ilustración 92 Montaje polea soporte superior</i>	90
<i>Ilustración 93 Embutición en polea de tuercas M8</i>	91
<i>Ilustración 94 Montaje finalizado polea de soporte motor bajo</i>	91
<i>Ilustración 95 Esquema montaje polea soporte motor bajo</i>	92
<i>Ilustración 96 Vistas polea soporte motor bajo</i>	93
<i>Ilustración 97 Estructura cuatro apoyos</i>	93
<i>Ilustración 98 Introducción del rodamiento del montaje polea motor soporte bajo</i>	94
<i>Ilustración 99 Montaje estructura impresora 3D RepRap Morgan</i>	94
<i>Ilustración 100 Montaje final estructura RepRap Morgan</i>	95
<i>Ilustración 101 Ejemplo colocación soporte motor bajo y correa T2.5</i>	95
<i>Ilustración 102 Carcasa-soporte para fuente de alimentación</i>	96
<i>Ilustración 103 Fuente de alimentación fijada en la carcasa-soporte</i>	97
<i>Ilustración 104 Interruptor con toma de corriente y cable</i>	98
<i>Ilustración 105 Interruptor cableado (Fuente: HTA3D. Recuperado de: <a href="https://www.hta3d.com/es/toma-de-corriente-con-interruptor-para-fuente-de-alimentacion">https://www.hta3d.com/es/toma-de-corriente-con-interruptor-para-fuente-de-alimentacion</a>)</i>	98
<i>Ilustración 106 Materiales para soldar los cables</i>	98
<i>Ilustración 107 Cables soldados en interruptor</i>	99
<i>Ilustración 108 Interruptor conectado a fuente de alimentación</i>	99
<i>Ilustración 109 Introducción de fusible en interruptor</i>	100
<i>Ilustración 110 Fusible de 6ª para protección ante cortocircuitos</i>	100
<i>Ilustración 111 Relé de la cama caliente</i>	101
<i>Ilustración 112 Guía fijación relé</i>	101

<i>Ilustración 113 Esquema conexiones Relé-Cama caliente (Fuente: Impresoras3Dlowcost Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2Lsg0dl">https://bit.ly/2Lsg0dl</a>)</i>	102
<i>Ilustración 114 Conexión D8+ D8- en la placa Arduino</i>	102
<i>Ilustración 115 Conexiones en el relé</i>	102
<i>Ilustración 116 Crimpadora</i>	103
<i>Ilustración 117 Terminales de pinza</i>	103
<i>Ilustración 118 Conectores Dupont</i>	103
<i>Ilustración 119 Proceso de crimpado</i>	104
<i>Ilustración 120 Placa Arduino MEGA 2560 montada en carcasa impresa en 3D</i>	105
<i>Ilustración 121 Drivers A4988</i>	105
<i>Ilustración 122 RAMPS 1.4, con Drivers A4988, montada sobre placa Arduino MEGA</i>	105
<i>Ilustración 123 Conexiones RAMPS 1.4 en placa Arduino MEGA 2560 (Fuente: Infinitrónica. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2YuRPYA">https://bit.ly/2YuRPYA</a>)</i>	106
<i>Ilustración 124 Disposición placa Arduino MEGA 2560</i>	107
<i>Ilustración 125 Componentes de la pantalla LCD Full Graphics</i>	107
<i>Ilustración 126 Conexiones pantalla LCD en las RAMPS 1.4</i>	108
<i>Ilustración 127 Pantalla LCD Full Graphics</i>	108
<i>Ilustración 128 Ventilador de la placa Arduino MEGA 2560</i>	109
<i>Ilustración 129 Sensor de efecto Hall modelo A3144. (Fuente: Uchi. Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2RHzhJ8">https://bit.ly/2RHzhJ8</a>)</i>	110
<i>Ilustración 130 Esquema conexiones sensor de efecto Hall</i>	110
<i>Ilustración 131 Componentes de circuito sensor de efecto Hall</i>	111
<i>Ilustración 132 Patillas sensor Hall soldadas a cables</i>	111
<i>Ilustración 133 Conexiones en placa PCB circuito impreso</i>	111
<i>Ilustración 134 Final de carrera mecánico atornillado en soporte</i>	112
<i>Ilustración 135 Final de carrera mecánico atornillado en soporte, vista de perfil</i>	112
<i>Ilustración 136 Tope impreso final de carrera mecánico</i>	113
<i>Ilustración 137 Colocación soporte del final de carrera mecánico</i>	113
<i>Ilustración 138 Arduino IDE con el código Marlin</i>	115
<i>Ilustración 139 Determinación parámetros de Denavit-Hartenberg en RoboAnalyzer</i>	120
<i>Ilustración 140 Brazo de 2 eslabones en posición inicial</i>	121
<i>Ilustración 141 Brazo de 2 eslabones en posición final y con trayectoria</i>	121
<i>Ilustración 142 Posición trayectoria del final del eslabón 1 en X e Y</i>	122
<i>Ilustración 143 Posición trayectoria del final del eslabón 2 en X e Y</i>	122
<i>Ilustración 144 Cambio de ángulos en articulaciones según trayectoria</i>	123
<i>Ilustración 145 Configuración cinemática inversa</i>	124
<i>Ilustración 146 Parámetros datos y soluciones cinemática inversa mediante RoboAnalyzer</i>	124



<i>Ilustración 147 Cinemática inversa SCARA paralela Método geométrico</i>	<i>126</i>
<i>Ilustración 148 Zona crítica en Morgan arm Theta b con el rodamiento</i>	<i>129</i>
<i>Ilustración 149 Esfuerzos radiales Morgan arm Theta b con el rodamiento</i>	<i>130</i>
<i>Ilustración 150 Propiedades PLA</i>	<i>130</i>
<i>Ilustración 151 Simplificaciones de simulación SCARA paralela</i>	<i>132</i>
<i>Ilustración 152 Propiedades del Ácido Poliláctico o PLA (Fuente: Ansys)</i>	<i>133</i>
<i>Ilustración 153 Propiedades PLA (Fuente: Ansys)</i>	<i>133</i>
<i>Ilustración 154 Brazo "arm Theta" a simular</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 155 Brazo "arm Theta" con sujeción, cargas y pasador en caso de SCARA paralela</i>	<i>134</i>
<i>Ilustración 156 Tensiones de von Mises en configuración SCARA paralela</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 157 Deformaciones en configuración SCARA paralela</i>	<i>135</i>
<i>Ilustración 158 Cargas en configuración SCARA "pura"</i>	<i>136</i>
<i>Ilustración 159 Tensión de von Mises en configuración SCARA "pura"</i>	<i>137</i>
<i>Ilustración 160 Deformaciones en configuración SCARA "pura"</i>	<i>137</i>
<i>Ilustración 161 Propiedades del material AISI Acero inoxidable</i>	<i>139</i>
<i>Ilustración 162 Tensión de von Mises con AISI 316L Acero inoxidable</i>	<i>140</i>
<i>Ilustración 163 Deformaciones AISI 316L Acero inoxidable</i>	<i>140</i>



## Índice de tablas

<i>Tabla 1 Clasificación de los métodos de impresión 3D (Fuente:Métodos de Impresión 3D. (2014). Recuperado de: <a href="https://bit.ly/2ldrj7n">https://bit.ly/2ldrj7n</a>)</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2 Materiales brazo (arm PSI)</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 3 Materiales brazo (arm Theta)</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 4 Lista materiales montaje polea soporte motor bajo</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 5 Resumen presupuesto</i>	<i>117</i>

## 1 Introducción

La impresión 3D ha perfeccionado su técnica en la última década de forma muy considerable, lo cual se ha visto reflejado en el mayor número de empresas que incorporan impresoras 3D para la fabricación de piezas o prototipos de forma rápida y económica.

A pesar de que en áreas de diseño industrial e ingeniería esta tecnología se ha normalizado y se encuentra al orden del día, han aparecido nuevas áreas de aplicación como la medicina y la construcción, entre otras, las cuales aseguran un futuro estimulante para la investigación y desarrollo de la impresión 3D, la cual, de seguir avanzando, resolvería una gran cantidad de problemas y complicaciones, teniendo en cuenta todos los que ya resuelve actualmente.

Además, las impresoras 3D de uso doméstico o particular se han normalizado, por lo que cada vez más gente tiene acceso a esta tecnología desde su casa.

Por tanto, parece importante, en opinión del autor, acercar y facilitar conocimientos y conceptos básicos de impresión 3D a través de este documento, el cual pretende ser un proyecto de construcción 3D de la impresora RepRap Morgan, pero que, a la vez, sirva a cualquier persona interesada en acercarse al mundo de la impresión 3D. Por tanto, se pueden ver apartados propios de un proyecto como presupuesto, planos, etc., pero sin renunciar a un fin más genérico, que es la creación de una Guía básica sobre la impresión 3D.

Aunque este documento está centrado en el montaje del modelo RepRap Morgan, el cual es un modelo peculiar y no muy común, que destaca por su atractivo diseño, éste puede no ser el mejor modelo desde un punto de vista de rapidez en la fabricación de las piezas impresas y posterior montaje, por lo que, se avisa al lector que si se prefiere realizar otra impresora en un menor tiempo, se recomienda fabricar otro modelo de RepRap, de tipo cartesiano. No obstante, muchos de los conocimientos o conceptos que se tratan aquí, son aplicables a un gran número de impresoras 3D.

## 2 Objeto

Los objetivos del presente Trabajo Fin de Grado quedan definidos por los siguientes puntos:

1. La fabricación y montaje de una impresora 3D RepRap Morgan.
2. La creación de una guía básica que pueda dar las pautas básicas para facilitar a cualquier persona con unos conocimientos básicos el montaje de este modelo de impresora, así como para servir de introducción a todos los conceptos básicos del mundo de la impresión 3D.
3. Aplicar conocimientos adquiridos en diferentes asignaturas durante la realización del grado en ingeniería mecánica, de forma que se puedan realizar diferentes estudios sobre la impresora para obtener información extra sobre sus características (estudio cinemático, propiedades mecánicas, ventajas y desventajas, etc).

## 3 Estado del arte

### 3.1 Introducción a la impresión 3D

La impresión 3D es un proceso mediante el cual una figura, forma u objeto físico es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material.

Por tanto, una impresora 3D será aquella máquina capaz de crear una pieza volumétrica a partir de un modelo virtual, el cual puede conseguirse diseñándolo en un programa de diseño asistido por ordenador (CAD) o gracias a la tecnología capaz de escanear un objeto real para reconstruir un modelo digital tridimensional.

#### *Marco histórico*

Aunque la tecnología de impresión 3D parezca algo relativamente novedoso, propio de esta última década, lo cierto es que ésta hizo su primera aparición en el año 1976, cuando se desarrollaron los primeros equipos de fabricación aditiva. En 1981, Hideo Kodama, del Instituto Industrial de Investigación Municipal de Nagoya publicó un sistema de prototipado rápido usando fotopolímeros. Esta tecnología no era comparable a la actual y no permitía trabajar con facilidad.

En 1984, Charles Hull inventó la estereolitografía, la cual permitía a los diseñadores, por primera vez, crear modelos 3D usando datos digitales. Presentó, el 8 de agosto de 1984, la patente ante la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos, la cual fue concedida.

En 1986, aparece el Sinterizado Láser Selectivo (SLS).

En 1989, se inventa y patenta el modelado por deposición fundida (FDM).

Esta tecnología, en sus comienzos, tenía muchas imperfecciones y era excesivamente cara, por lo que tuvo que pasar una evolución hasta convertirse en una tecnología fácil, accesible para el consumidor medio y con un acabado final de calidad. Actualmente, la impresión 3D es una de las tecnologías más usadas en el prototipado rápido por multitud de empresas.

Todas estas diferentes técnicas que se han citado aquí, serán explicadas en mayor detalle en el apartado “3.2 Métodos de prototipado rápido”.

### Aplicaciones de la impresión 3D

La impresión 3D tiene múltiples aplicaciones, algunas de ellas muy asentadas y comúnmente utilizadas y, otras, aún en fase de desarrollo y con un gran potencial.

Algunas de estas aplicaciones son:

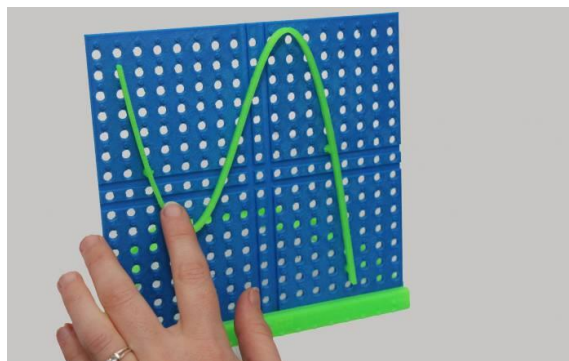
- Diseño industrial e ingeniería

Principalmente el prototipado rápido, para poder ver piezas o conjuntos a tamaño real y de forma física (en lugar de verlo de forma virtual). En otras ocasiones, dependiendo de las propiedades del material con que se imprima la pieza y de los esfuerzos que esta deba de soportar, la pieza impresa en 3D es un fin en sí mismo, siendo ésta la que será utilizada como producto final.

Hay que destacar sectores como automoción, aeronáutica, electrónica, entre otros.

- Educación

Puede servir tanto para instruir de todo el proceso producido en diseño hasta que el alumno consiga una pieza “real” (boceto, cálculos, creación en CAD, impresión del modelo). Pero, realmente, las aplicaciones pueden ser en cualquier campo de la educación (matemáticas, ciencias sociales, biología, etc.) permitiendo al alumno visualizar conceptos abstractos.



*Ilustración 1 Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS). 2015. “JUDITH, juego de enseñanza matemática para estudiantes con discapacidad visual” Recuperado de: <https://bit.ly/31wKyQQ>*

- Aplicación en la medicina

Este campo es, quizás, uno en los que la impresión 3D mayor potencial de desarrollo tiene a largo plazo. Tiene algunas aplicaciones donde ya se está perfeccionando la



técnica como en implantología dental, prótesis y articulaciones; así como nuevas áreas como impresión de órganos, ingeniería de tejidos e impresión con células madre.



*Ilustración 2 Prótesis impresa en 3D (Fuente: Joelfrax. 2017. Cambiando una vida: prótesis con impresiones en 3D. Recuperado de: <https://bit.ly/2KNQb7i>)*

- Sector alimenticio

Algunos proyectos encaminados a la personalización de alimentos, tanto salados como dulces en estado sólido, que permite llevar un control nutricional exhaustivo en la alimentación.

Además, destaca el uso en repostería, el cual es bastante sencillo, permitiendo imprimir formas en chocolate y otros alimentos.

- Construcción y arquitectura

Utilizada, actualmente, para conseguir maquetas de los proyectos. No obstante, se está desarrollando la posibilidad de implantar la construcción de viviendas mediante la fabricación aditiva, donde ya se han realizado varias pruebas.



*Ilustración 3 Construcción de una casa mediante impresión 3Dn (Fuente: Apis Cor. "Robotics in construction". Recuperado de: <https://www.apis-cor.com/>)*

- Joyería, moda y arte

Se puede observar un gran número de elementos impresos en 3D como: zapatos y zapatillas, bolsos, complementos, etc.

- Uso doméstico

Se debe destacar la página "<https://www.thingiverse.com/>", en la cual se puede tanto descargar como compartir diseños realizados en CAD (normalmente se descarga en formato ".stl"), de manera que cada persona pueda fabricar ese diseño en su propia casa.

### 3.2 Métodos de prototipado rápido

En este apartado se detallan los principales sistemas de prototipado rápido. Se dejarán a un lado técnicas como la mecanización por control numérico, para centrarse en los sistemas de prototipado que utilizan la impresión 3D, es decir, técnicas de prototipado aditivas. Éstas son:

- Modelado por deposición fundida (FDM)

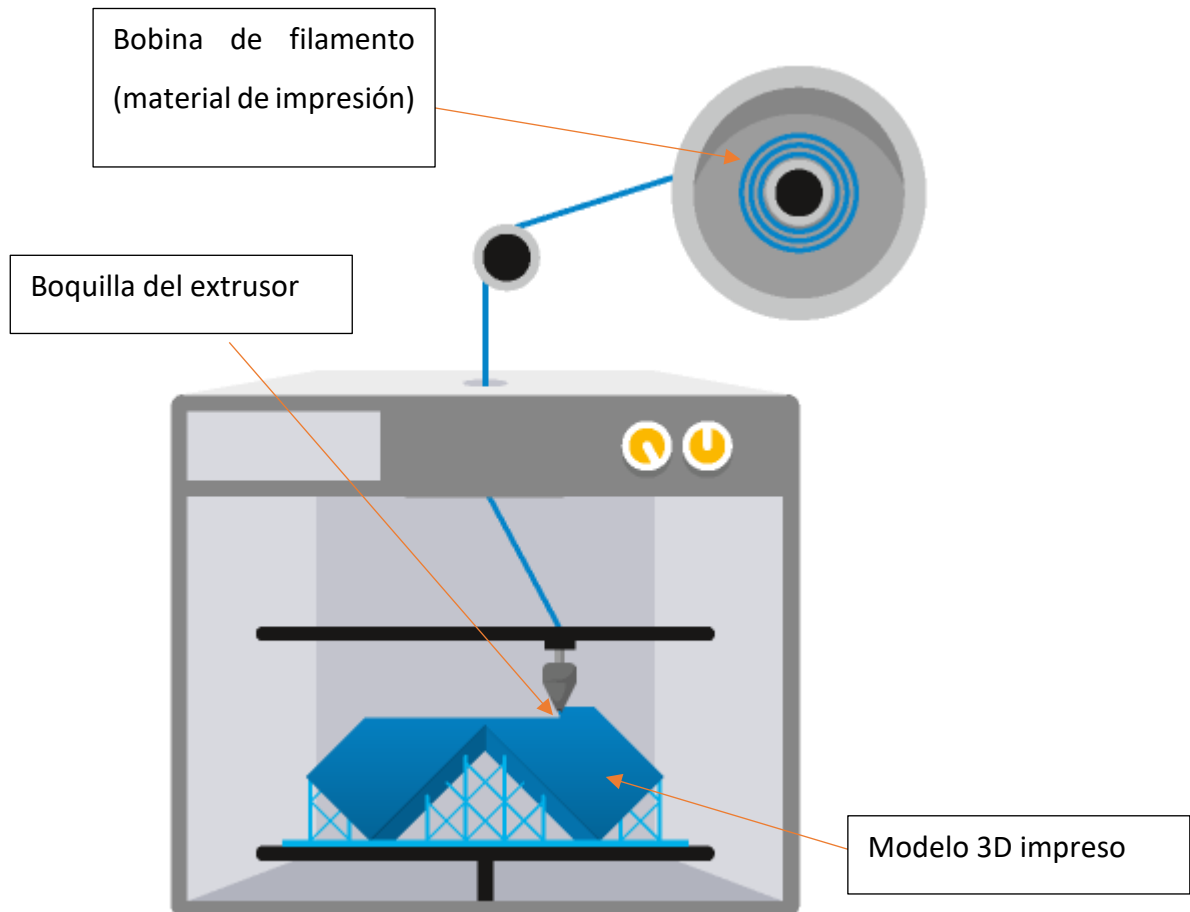
Llamado FDM por sus siglas en inglés (Fused Deposition Modeling), es uno de los métodos más usados actualmente, debido a su bajo precio y facilidad de uso. Por ello, es el método más usado, actualmente, en impresoras de uso doméstico. La impresora desarrollada en el presente documento (RepRap Morgan) pertenece a esta categoría de la impresión 3D.

El funcionamiento consiste en hacer pasar el filamento, normalmente un termoplástico, de una bobina a través de un extrusor caliente, el cual derrite el material lo suficiente para que este se adhiera a la capa inferior del modelo o pieza que está siendo creado. De esta forma, capa tras capa, la pieza es creada.



*Ilustración 4 Ejemplo de impresora FDM (Fuente: SIMPLE 3D. "Original Prusa i3 MK3s". Recuperado de <https://simple3d.com.ar/producto/original-prusa-mk3/>)*

A continuación, se muestra un esquema básico del funcionamiento de este método de impresión:



*Ilustración 5 Esquema impresión FDM (Fuente: Recuperado de <https://www.materialise.com>)*

En cuanto a las características de este tipo de impresoras, hay que destacar que son muy baratas, sobre todo el material de impresión (una bobina de filamento de material termoplástico, de calidad media, de 1 kg puede rondar los 20€). Como desventajas, habría que decir que cuando las tolerancias y/o calidades superficiales de la pieza son muy importantes, este método no es el más apropiado.

En cuanto a los materiales utilizados para imprimir, los más utilizados son termoplásticos como, entre otros, el ácido poliláctico (PLA) o el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS); pero además de termoplásticos, el método FDM acepta materiales muy diversos e, incluso extravagantes, como pueden ser la cera y el chocolate y otros alimentos de repostería.

- Fabricación por haz de electrones (EBF<sup>3</sup>)

Por sus siglas en inglés, Electron-beam Freeform Fabrication. Destacar que es un invento de la NASA ideado para crear piezas en ambientes de gravedad cero.

El proceso de funcionamiento ocurre en una cámara de vacío, donde un haz de electrones orientado sobre un alambre crea un baño de fusión. El metal se solidifica casi al momento de retirar el haz de electrones. De esta forma, capa por capa, y, siguiendo los recorridos de deposición determinados, se crea la pieza deseada.

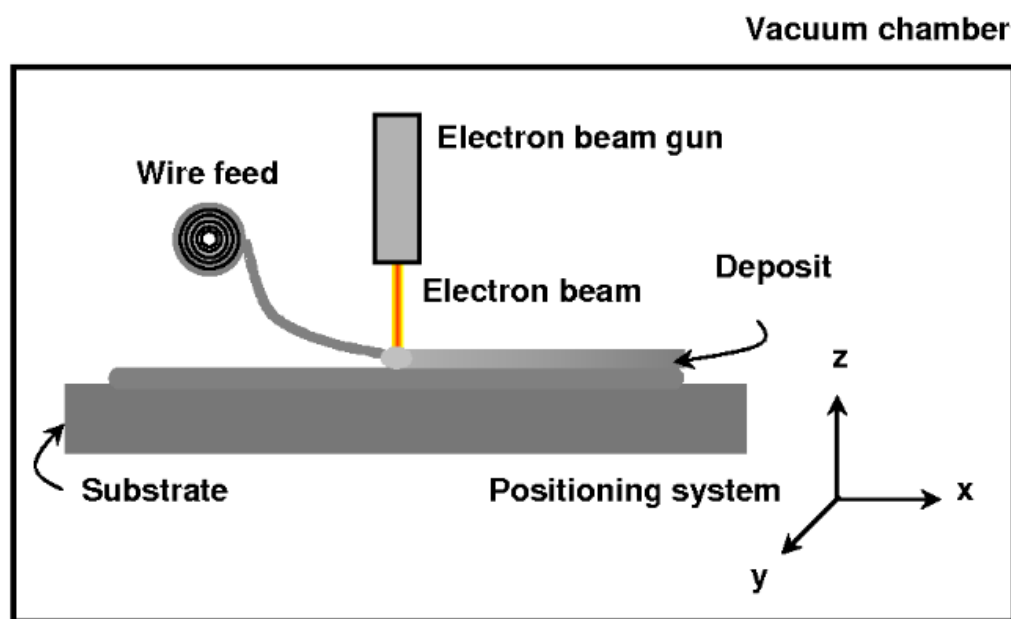


Ilustración 6 Fabricación por haz de electrones (Fuente: Karen M. Brown Taminger, Robert A. Hafley. Publicado en 2006. Recuperado de: <https://bit.ly/31lOF26>)

- Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)

Llamado DMLS por sus siglas en inglés (Direct Metal Laser Sintering).

Inicialmente se aplica una capa de polvo metálico. Después, se sinterizan mediante láser las partes que convengan según el modelo 3D que se quiera crear. Una vez sinterizada esa capa, se vuelve a aplicar otra capa nueva de polvo metálico y se repite el proceso. De esta forma, capa tras capa, se crea el modelo 3D.

- Fusión por haz de electrones (EBM)

Del inglés, "Electron Beam Melting".

Las piezas se construyen a través de la superposición de capas de metal en polvo.

A medida que se añade una nueva capa, ésta se funde mediante un haz de electrones que sigue un patrón de movimiento determinado para formar el modelo 3D.

- Sinterizado selectivo por calor (SHS)

Del inglés, Selective Heat Sintering.

El funcionamiento se basa en la fusión de polvos termoplásticos mediante la aplicación de calor, formando, capa tras capa, la pieza en 3D.

Esta técnica usa un cabezal de impresión térmico, en vez de usar un láser de alta potencia. Además, únicamente se puede utilizar con polvo termoplástico.

- Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Llamado SLS por sus siglas en inglés, Selective Laser Sintering.

Su funcionamiento también implica el sinterizado de capas de material en polvo. No obstante, estas capas son muy finas (décimas de milímetro) y se colocan en un tanque el cual ha sido calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo.

Se utiliza un láser de alta potencia sobre puntos concretos, causando que las partículas se fusionen y posteriormente solidifiquen para formar la pieza.

Las piezas no necesitan material de soporte debido a que se apoyan en el material en polvo que no ha sido sinterizado.

A continuación, se puede observar un esquema del funcionamiento:

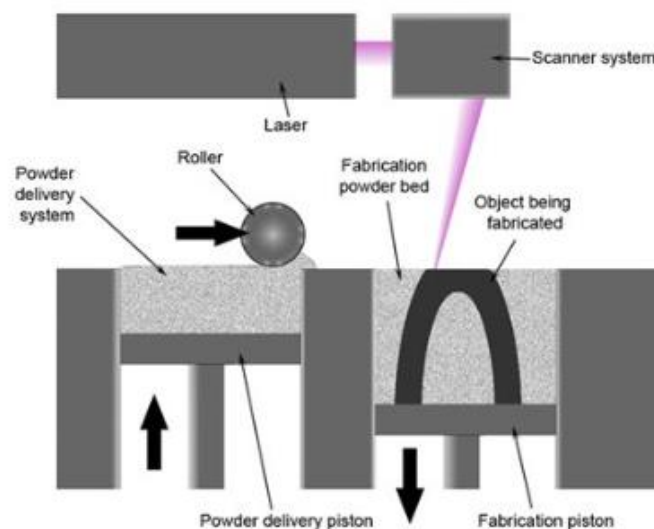


Ilustración 7 Funcionamiento SLS (Fuente: The Technology House. (s.f.) Selective Laser Sintering (SLS)  
Recuperado de: <https://www.tth.com/3d-printing/sls-prototyping/>)

- Proyección aglutinante (DSPC)

El método DSPC (del inglés, Direct Shell Production Casting), utiliza el proceso de impresión por capas. Un material aglutinante es añadido en las partes de polvo cerámico donde convenga para crear la pieza. El material aglutinante penetra en los poros de las partes de material en polvo y se adhieren formando una estructura. Una vez el proceso ha terminado, se limpia el exceso de polvo restante y se hornea la pieza. Este método se utiliza para crear moldes de cerámica, los cuales suelen ser más precisos que los moldes de arena. Posteriormente se suelen usar como molde para piezas metálicas.

- Laminado de capas (LOM)

El método LOM (del inglés, Laminated Object Manufacturing), crea prototipos capa por capa mediante materiales en forma de lámina como papel, plástico o metal.

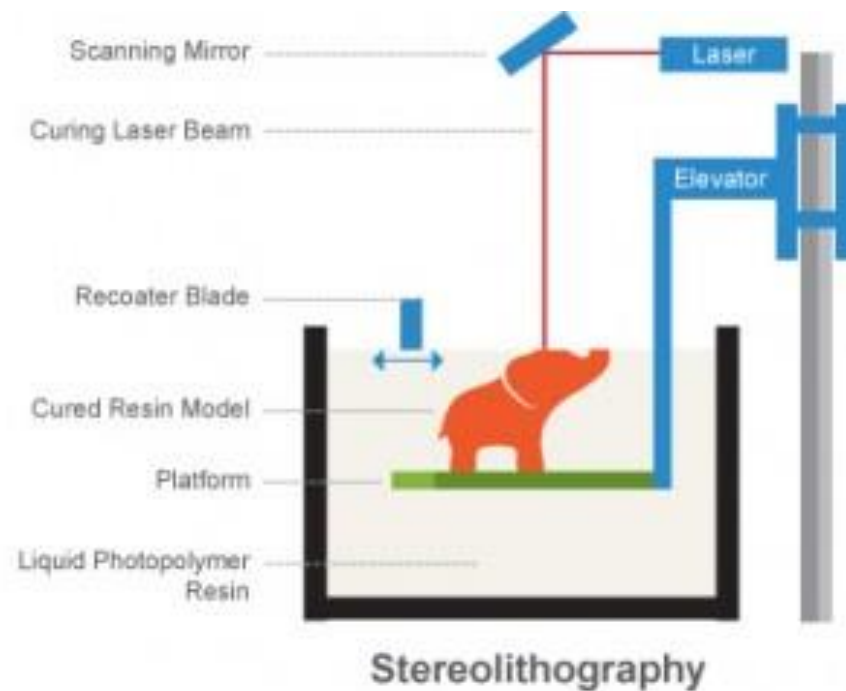
Cada lámina de material es pegada a la anterior, ya que llevan en la superficie un material adhesivo el cual fija las dos láminas, tras la presión ejercida por un rodillo caliente. Cada capa que se crea es cortada con la forma deseada mediante una cuchilla o un láser.

- Estereolitografía (SLA)

La técnica SLA es la abreviatura en inglés de Stereolithography Apparatus. Es una de las más populares y utilizadas por un gran número de usuarios, junto con el método FDM. A diferencia de este último, la SLA puede crear piezas con detalles complicados y consiguiendo una calidad superficial mayor que con el FDM. Sin embargo, tiene desventajas como que las piezas no suelen ser resistentes a largos períodos de exposición al sol y, además, el coste medio de este tipo de impresión es bastante mayor, ya que utiliza unas resinas fotopoliméricas.

En cuanto al funcionamiento, se utiliza un depósito o recipiente con resina líquida en su interior. Utilizando un láser ultravioleta (UV), esta resina se cura para solidificarla capa por capa. Por tanto, dispone de una plataforma que, cuando una capa ha sido endurecida mediante el proceso de curación, desciende para permitir que la resina se coloque por encima de la pieza y, de esta forma, volver a realizar el proceso de curación hasta que se haya completado la pieza.

En el siguiente esquema, se puede observar el principio básico de funcionamiento:



*Ilustración 8 Funcionamiento estereolitografía (Fuente: PRINTSPACE3D. (s.f.). Recuperado de: [https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/stereolithography\\_illustration-2/](https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/stereolithography_illustration-2/))*

- Fotopolimerización ultravioleta (SGC)

Llamado SGC por sus siglas en inglés (Solid Ground Curing).

Al igual que el método de la estereolitografía, el SGC también pertenece a la clasificación de la fotopolimerización.

El funcionamiento también es muy similar al de la estereolitografía, con la diferencia de que, en este caso, en vez de utilizar un láser UV para la curación de la resina, se emplea un proyector DLP que proyecta la luz ultravioleta sobre las partes de la resina líquida que se quieren endurecer para formar la pieza en 3D.



Por último, se muestra una tabla, a modo de resumen, con todos los métodos expuestos anteriormente:

Tipo	Tecnologías
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM)
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF <sup>3</sup> )
Granulado	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)
	Fusión por haz de electrones (EBM)
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)
	Proyección aglutinante (DSPC)
Laminado	Laminado de capas (LOM)
Fotoquímicos (Fotopolimerización)	Estereolitografía (SLA)
	Fotopolimerización ultravioleta (SGC)

Tabla 1 Clasificación de los métodos de impresión 3D (Fuente: Métodos de Impresión 3D. (2014). Recuperado de: <https://bit.ly/2ldrj7n>)

### 3.3 Configuraciones de un robot

En este apartado se describen las posibles configuraciones que existen para un robot industrial.

Hay que diferenciar la configuración que tiene una impresora, desde el punto de vista de cómo se mueve ésta y del funcionamiento de la estructura entendida ésta como un robot, independientemente del método de impresión que utilice, los cuales han sido explicados en el apartado anterior.

Se debe entender que una impresora 3D es un robot industrial, ya que encaja en la definición de robot industrial que ofrece la Organización Internacional de Estándares (ISO), por la cual queda definido el término “robot industrial” como:

*“Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas”.*

A continuación, se observa un esquema con las principales configuraciones de un robot, según su estructura:

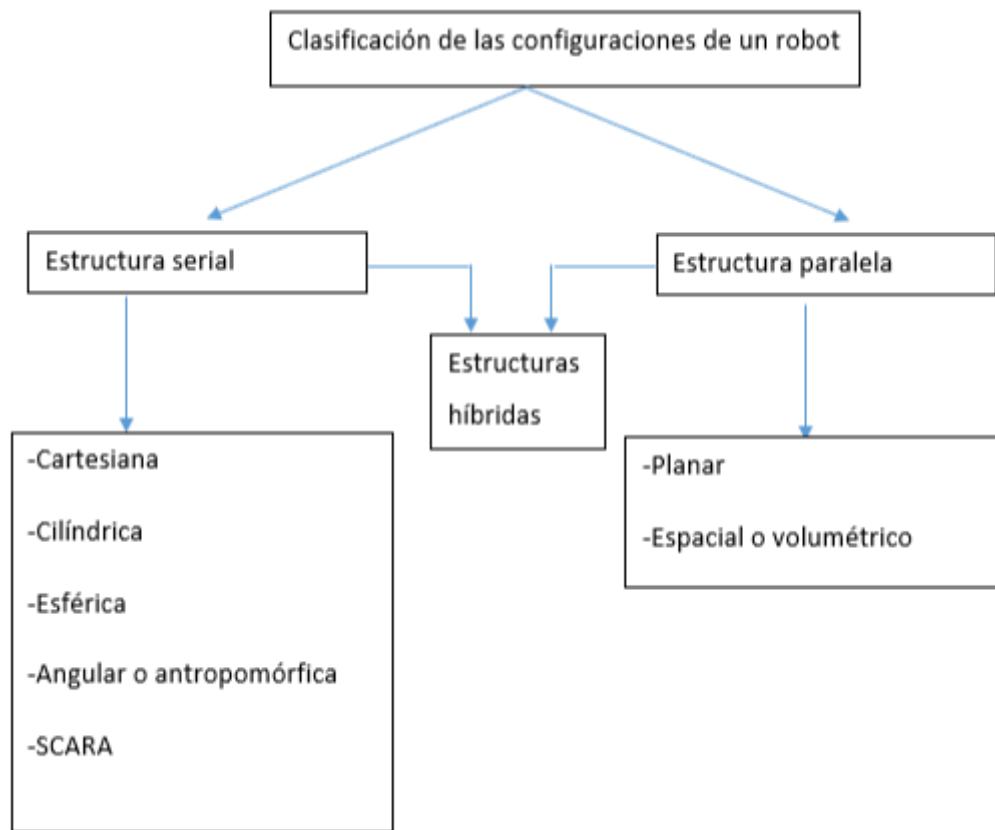


Ilustración 9 Clasificación de las configuraciones de un robot

### Robots industriales seriales

Los robots seriales son, actualmente, los robots industriales más comunes y utilizados. Están formados por una sucesión de eslabones, cada uno de ellos unido a su eslabón predecesor y a su sucesor, mediante una unión de un grado de libertad; por ejemplo, una unión rotacional (par de revoluta) o una unión traslacional. Para obtener el nº de grados de libertad en los robots seriales, basta con sumar los grados de libertad de cada articulación que lo compone. En muchas ocasiones, este tipo de robots suele adoptar una estructura antropomórfica mediante un brazo.

Dentro de los robots seriales, se puede distinguir:

- Configuración cartesiana  
Posee tres movimientos lineales (articulaciones prismáticas) en los ejes X, Y, Z; éstos son ortogonales entre sí.  
Esta configuración tiene tres grados de libertad (uno por cada movimiento lineal).

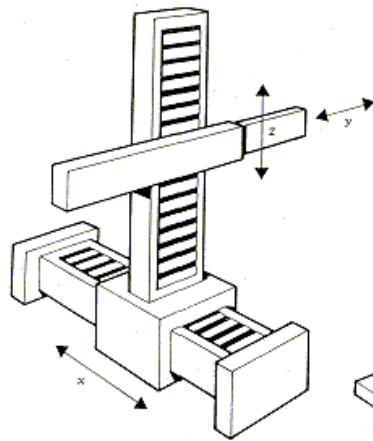


Ilustración 10 Configuración cartesiana (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <https://bit.ly/2WN70Xm>)

- Configuración cilíndrica

Tiene un movimiento rotacional (alrededor del eje Z en la ilustración 11 de ejemplo) y dos movimientos lineales (Z e Y), por lo que tiene tres grados de libertad.

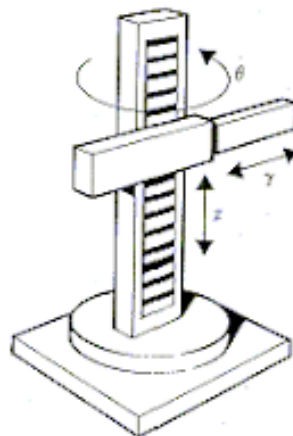


Ilustración 11 Configuración cilíndrica (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <https://bit.ly/2WN70Xm>)

- Configuración esférica (Polar)

Tiene un movimiento rotacional, otro angular y uno lineal.

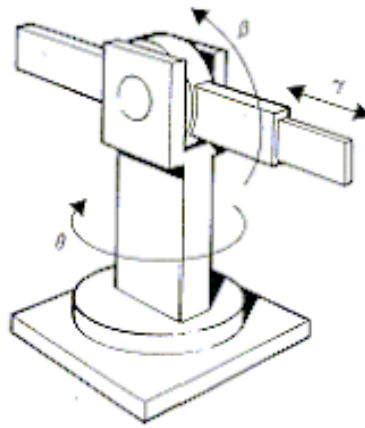


Ilustración 12 Configuración esférica o polar (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <https://bit.ly/2WN70Xm>)

- Configuración angular o antropomórfica (Brazo articulado)

Tiene dos articulaciones con movimientos angulares y una articulación, en la base, con movimiento rotacional.

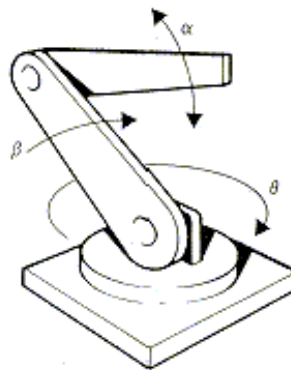


Ilustración 13 Configuración angular o antropomórfica, brazo articulado. (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <https://bit.ly/2WN70Xm>)

- Configuración SCARA (del inglés, Selective Compliant Assembly Robot Arm)

Tiene un movimiento lineal y dos o tres articulaciones rotacionales, por lo que, dependiendo de este último dato, tendrá en total tres o cuatro grados de libertad. En las ilustraciones 14 y 15 se pueden observar dos ejemplos para configuraciones de tipo SCARA de tres y cuatro grados de libertad, respectivamente.

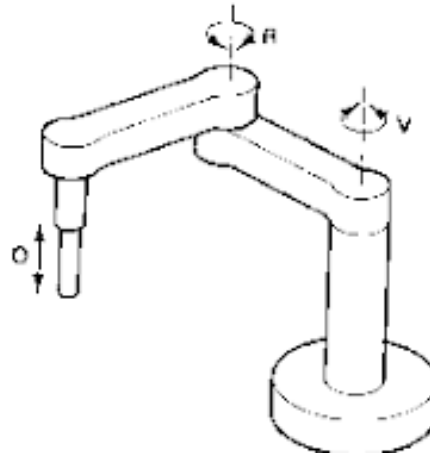


Ilustración 14 Configuración SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm) (Fuente: GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT. (2008). Recuperado de: <https://bit.ly/2WN70Xm>)

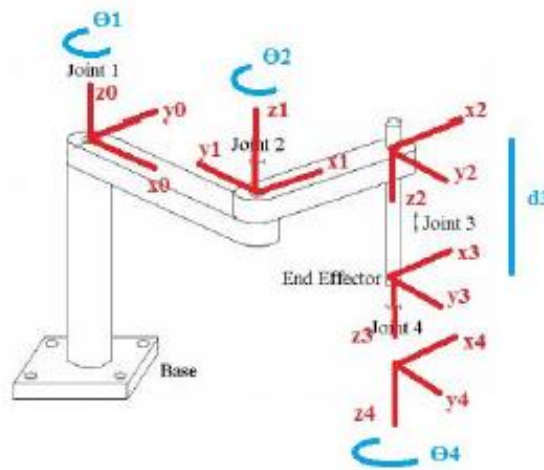


Ilustración 15 Configuración SCARA de 4 grados de libertad (Fuente: Perdomo, J.F., Ramírez, M.A., Ramírez, H.M. & Rodríguez, C. (s.f.), Universidad Nacional Autónoma de México, "Robot SCARA de 4 Grados de Libertad con Efecto Mecánico")

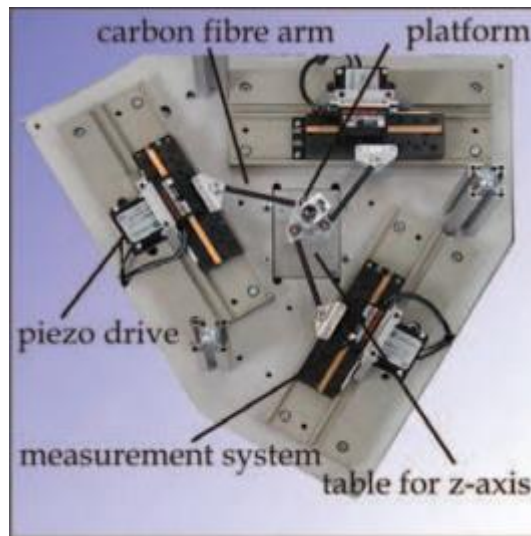
### Robots industriales paralelos

Un robot paralelo está formado por un mecanismo con una cadena cinemática cerrada, cuyo actuador final (pinza o herramienta) está unido a la base por varias cadenas cinemáticas independientes. Obtener el nº de grados de libertad en los robots paralelos, es una tarea más difícil que en el caso de los robots seriales, ya que sólo un subconjunto de las articulaciones puede ser movido de forma independiente. Por tanto, el nº de grados de libertad en un robot paralelo corresponde al nº de uniones que pueden ser movidas de forma independiente.

Dentro de los robots paralelos, se puede distinguir:

- Configuración paralela plana

Cuando todos los eslabones se mueven en el mismo plano.



*Ilustración 16 Robot paralelo plano, estructura micabo-e (Fuente:Schöttler, K., Raatz, A., & Hesselbach, J., (s.f.), "Size-adapted Parallel and Hybrid Parallel Robots for Sensor Guided Micro Assembly")*

- Configuración paralela espacial o volumétrica

Tienen los eslabones dispuestos en paralelo.

Cada articulación es tanto prismática como rotatoria.

Un ejemplo típico de este tipo de configuración paralela es la plataforma de Stewart-Gough, formada por 6 "patas". Cada eslabón está unido por una articulación prismática y una esférica.

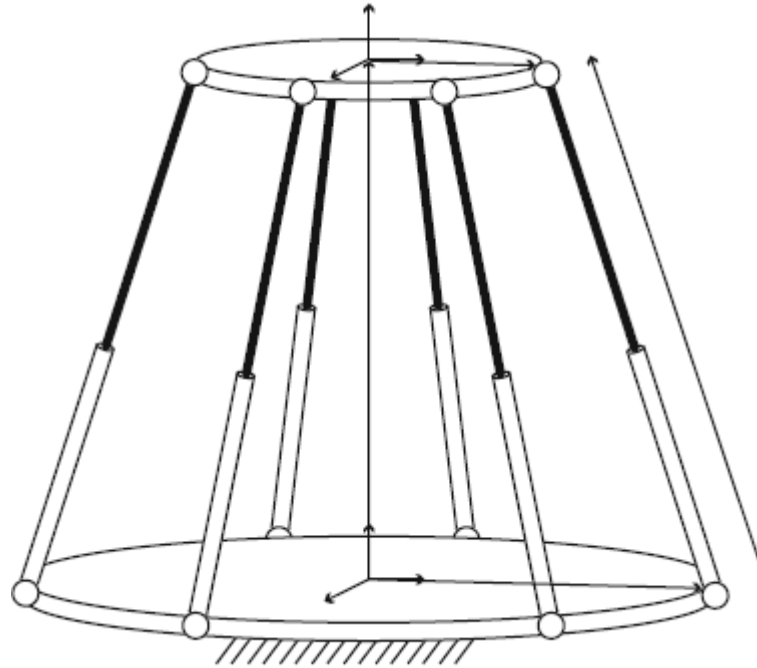


Ilustración 17 Plataforma de Stewart-Gough (Fuente: Park, F.C., (s.f.) Robotics Laboratory, Seoul National University. "Parallel Robots")

### 3.3.1 Tipos de impresora 3D según su estructura/configuración

Una vez que se conocen las posibles configuraciones que puede tener un robot (de forma general, independientemente de en qué fin sean utilizados éstos), en este apartado se van a nombrar los diferentes tipos de impresora 3D según su estructura y configuración (basadas en la clasificación general de los robots). Todos los ejemplos de este apartado serán para impresoras con el método FDM (Modelado por Deposición Fundida).

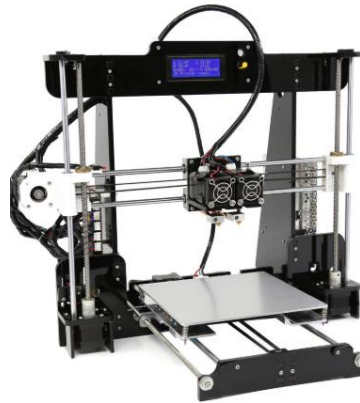
Se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Impresora 3D configuración Cartesiana

Estas impresoras siguen la configuración cartesiana, la cual ha sido explicada en el apartado anterior.

A continuación, se observa un ejemplo de impresora cartesiana:





*Ilustración 18 Ejemplo de Impresora 3D Cartesiana. Modelo Anet A8. (Fuente: Bang Good. Recuperado de: <https://bit.ly/2WPbInf>)*

- Impresora 3D tipo Delta

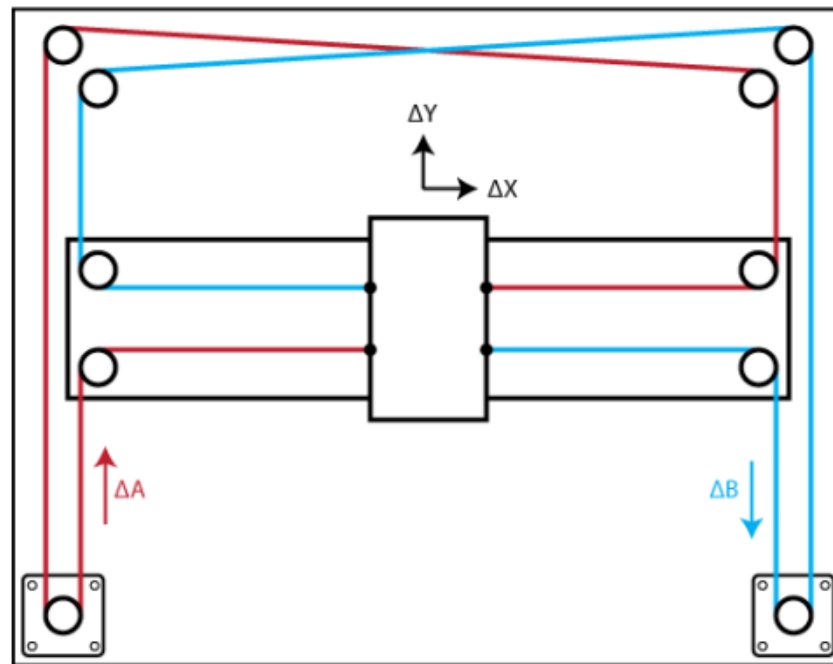
Este tipo de impresoras pertenece a la configuración paralela espacial de un robot. Dentro de las impresoras de modelado por deposición fundida, éstas son las más rápidas. La impresora está formada por tres ejes verticales, cada una con una articulación con movimiento lineal a través de este eje. De cada una de estas articulaciones sale un brazo que permite rotación y en el centro se encuentra el extrusor, sujetado por estos brazos. La rapidez de este tipo de impresoras es gracias a esta disposición, en la que un pequeño movimiento de motor produce un rápido movimiento del extrusor.



*Ilustración 19 Ejemplo de impresora 3D tipo Delta. Modelo: Rostock (Fuente: LoveLogo. Recuperado de: <https://bit.ly/2XkOaWU>)*

- Impresora 3D tipo Core XY

En este tipo de impresoras, el extrusor se desplaza en los ejes X e Y, utilizando un sistema de correas, en el que el movimiento se produce “tirando” de las correas mediante motores.



Equations of Motion:

$$\Delta X = \frac{1}{2} (\Delta A + \Delta B), \quad \Delta Y = \frac{1}{2} (\Delta A - \Delta B)$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \quad \Delta B = \Delta X - \Delta Y$$

Ilustración 20 Esquema del funcionamiento de una impresora 3D tipo Core XY. (Fuente: Hajjar, G., (2018). "Design and construction of a photoplotter". Recuperado de: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1222421/FULLTEXT01.pdf>)

- Impresora 3D Polar

Este tipo de impresora no es muy común, al menos de momento. Sin embargo, a pesar de ser muy raras de ver, las impresoras polares están emergiendo y se está empezando a considerar el gran potencial que pueden llegar a tener. Una de las ventajas es que sólo necesitan dos motores para funcionar: uno de ellos mueve y rota la plataforma de impresión y el otro motor se encarga de regular la altura (eje Z) del extrusor.

Se usa un sistema de coordenadas polares, en el que para definir un punto hace falta un ángulo y un radio o distancia a un centro predefinido. Por otra parte, el extrusor cambia de altura una vez que la capa ha sido completada.



Ilustración 21 Ejemplo de impresora 3D Polar (Fuente: Flynt, J., (2019). 3DINSIDER. "Cartesian, Delta, and Polar 3D Printers: What are They and What's the Difference?" Recuperado de: <https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/>)

- Impresora 3D configuración SCARA

Este tipo de impresoras no son muy comunes actualmente. La configuración que siguen ya ha sido explicada en el apartado anterior, en Configuración SCARA.

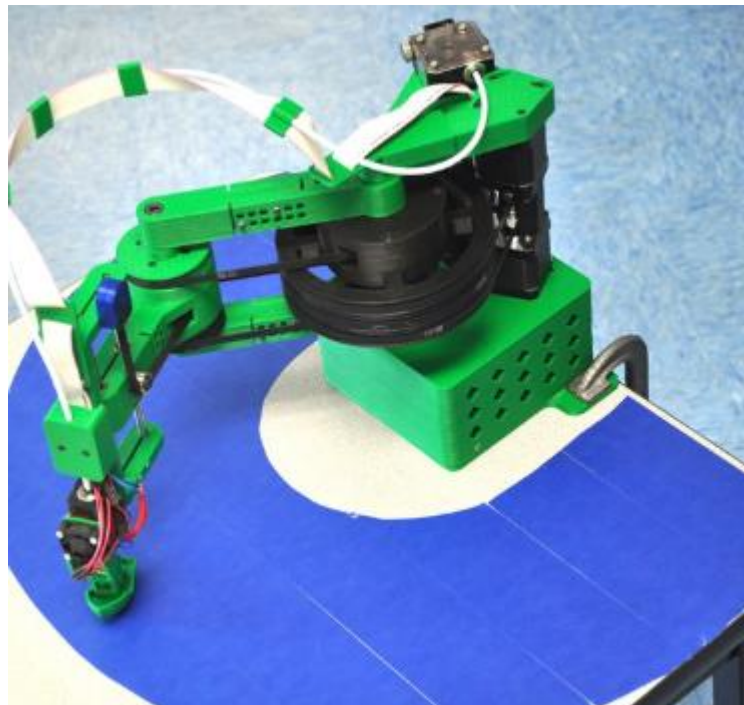
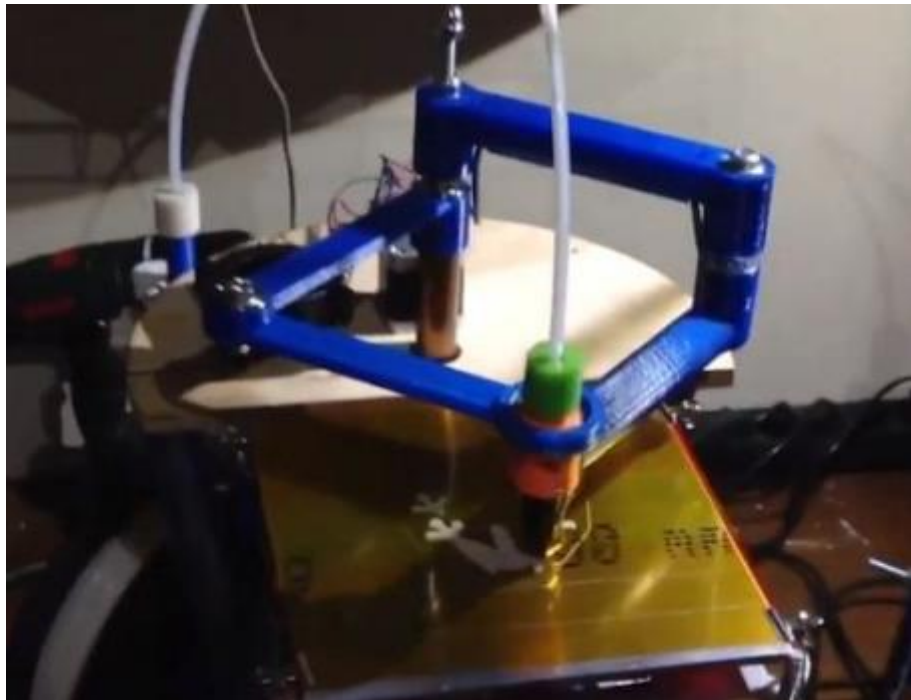


Ilustración 22 Ejemplo impresora 3D configuración SCARA. Modelo: RepRap HELIOS (Fuente: Hackaday.io. Recuperado de: <https://hackaday.io/project/21355-reprap-helios>)

### *SCARA paralela o SCARA de doble brazo*

Dentro de la configuración SCARA, aparece una estructura híbrida, llamada SCARA paralela, la cual tiene características propias de los robots de estructura serial (en concreto, la estructura SCARA) pero con algunas características que se aproximarían a una estructura paralela.

A esta “subconfiguración” pertenecería el modelo de impresora 3D tratado en este documento, el modelo RepRap Morgan. Este modelo y esta configuración será el principal objeto de estudio a tratar en próximos capítulos de este trabajo, por lo que será estudiada en mayor profundidad.



*Ilustración 23 Brazos de la Impresora RepRap Morgan tiene una configuración de SCARA paralela (Fuente: Les imprimantes 3d. (2013). "Morgan, une imprimante 3D à moins de 100€!" Recuperado de: <https://bit.ly/2XbDha1>)*

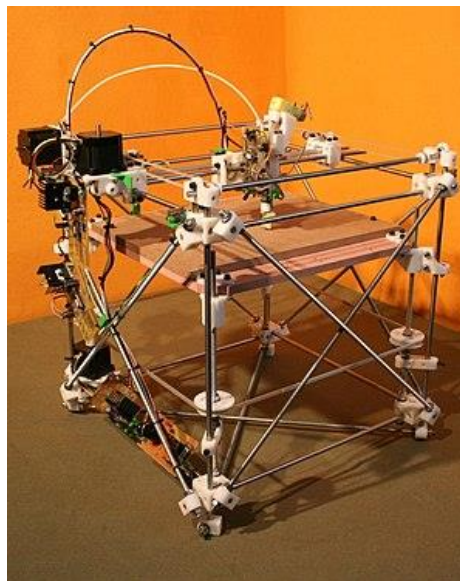
### 3.4 Proyecto RepRap

RepRap es la abreviatura en inglés de “Replicating Rapid-prototyper”, es decir, “Prototipador Rápido Replicante”.

El proyecto fue creado en 2005 por Adrian Bowyer, un ingeniero mecánico profesor en la Universidad de Bath (UK).

El objetivo del proyecto era la creación de máquinas capaces de autorreplicarse a sí mismas. A través de una impresora 3D inicial se podían construir infinitas copias de ésta. De esta forma, se reducían los costes de adquisición, en un momento en el que esta tecnología era muy cara y fuera de alcance para particulares, a una gran escala, debido al alto precio. A través de la plataforma RepRap se facilitarían los diseños y softwares necesarios (“Open Design” y “Free Software License”), por lo que sería muy fácil implementarlos de manera personal o, incluso, realizar modificaciones o mejoras en éstos.

El primer diseño del proyecto RepRap fue la impresora 3D modelo Darwin, la cual fue terminada en marzo de 2007.



*Ilustración 24 Impresora 3D RepRap. Modelo Darwin. (Fuente: Proyecto RepRap. Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto\\_RepRap](https://es.wikipedia.org/wiki/Proyecto_RepRap))*

### 3.5 Componentes principales en una impresora 3D

#### 3.5.1 Extrusor y Hotend

Estos dos componentes forman el sistema de extrusión (es por ello, que se han incluido en el mismo apartado. Son, quizás, los elementos más críticos en cuanto al resultado final de impresión, en especial el Hotend; por ello, será necesario prestar un especial interés a la hora de adquirir estos elementos.

A continuación, se muestra una breve explicación de cada uno:

- Extrusor o sistema de empuje

Es el que se encarga de mover o “tirar” del filamento en la bobina para llevarlo hasta el Hotend.

El extrusor se compone de varias partes:

- Engranaje de tracción: rueda dentada de 36 o 40 dientes, encargada de transmitir el movimiento del motor para mover el filamento.
- Motor paso a paso: se encarga de generar el movimiento. Este componente será explicado en mayor detalle más adelante.
- Rodamiento de presión: oprime o realiza fuerza en el filamento contra el engranaje de tracción, para que el filamento entre de manera continua.

En la siguiente imagen, se pueden diferenciar las principales partes del extrusor:

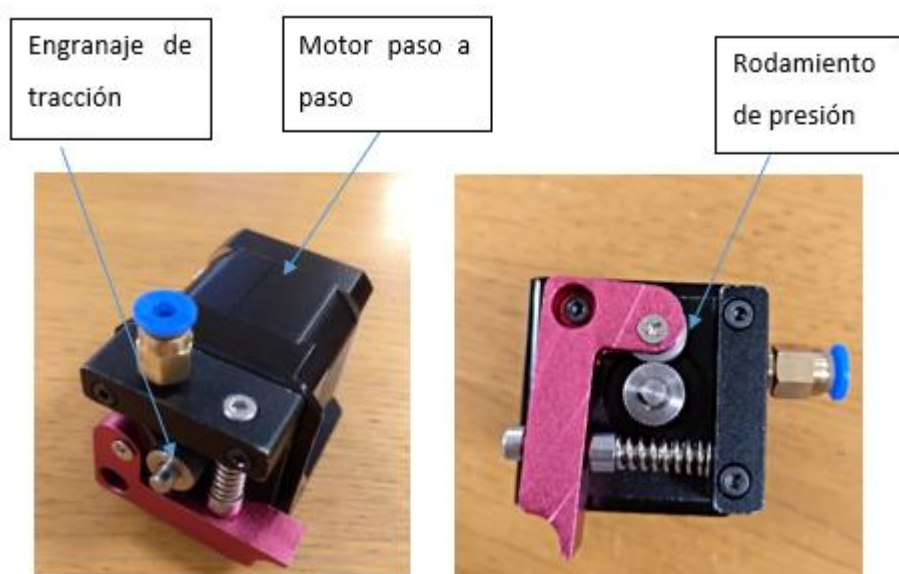


Ilustración 25 Extrusor / Sistema de empuje. Modelo: MK8 Bowden

- Hotend

Su función principal es fundir el plástico que sale por la boquilla. Es una de las partes críticas de la impresora, ya que es imprescindible el correcto funcionamiento para poder imprimir. Este componente puede ir junto al extrusor, en una pieza, o separado (Sistema Directo y Sistema Bowden, respectivamente), lo cual se explica en el siguiente subapartado “Tipos de extrusores”.

Partes del Hotend:

- Disipador de calor o “Heat Sink”  
Se utiliza para bajar la temperatura, ya que el calor sube y, de no existir esta pieza, el plástico se fundiría antes de llegar a la boquilla, lo que desencadenaría en problemas a la hora de imprimir.
- Ventilador  
Complementa y ayuda en su función al disipador de calor.
- Barrel o garganta  
Su función principal es dirigir el filamento hasta la boquilla.  
Está formado por un tornillo hueco, el cual puede llevar teflón (PTFE) en algunos casos para mejorar el deslizamiento del filamento.
- Bloque calentador o “Heat Block”  
Se utiliza para generar y mantener el calor que fundirá el filamento. Se necesita de un sensor de temperatura para mantener esta pieza a la temperatura óptima durante el proceso de impresión. Es una pieza que se encuentra entre el barrel y la boquilla.
- Boquilla o “Nozzle”  
La boquilla es la parte encargada de determinar con qué diámetro se va a extruir el material de impresión sobre el modelo a fabricar.

En la siguiente ilustración se pueden diferenciar, visualmente, las diferentes partes de un Hotend:



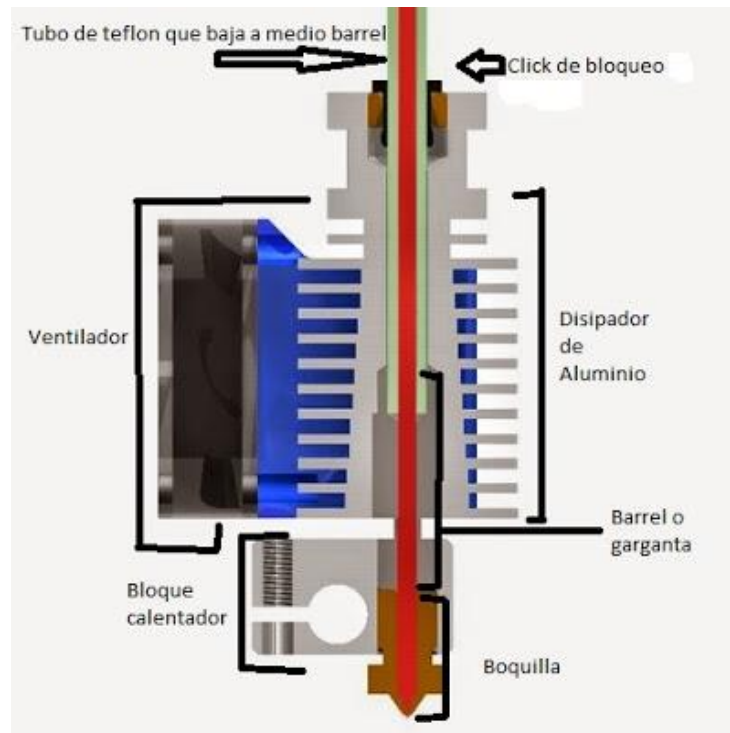


Ilustración 26 Partes del Hotend. Modelo: V6. (Fuente: THE MAKER 3DP. (2015). "Todo sobre mi V6 hotend". Recuperado de: <https://bit.ly/2XiSOVs>)

### Tipos de extrusores

Dependiendo del sistema que usen, se pueden diferenciar:

- Sistema Directo

Este tipo de sistema tiene el extrusor y el Hotend juntos, en una sola pieza.

Es el sistema más utilizado actualmente. El sistema de empuje, es decir, el motor, se encuentra sobre el Hotend. De esta forma es más fácil calibrar la extrusión. Además, también como ventaja, destacar que este sistema permite trabajar con materiales flexibles.

Como principal inconveniente, está el hecho de que, al tener el motor del sistema de empuje junto con el Hotend, las partes móviles del extrusor ven un aumento de peso muy considerable, lo que puede repercutir en vibraciones e imprecisiones al imprimir a altas velocidades.

### Extrusión Directa

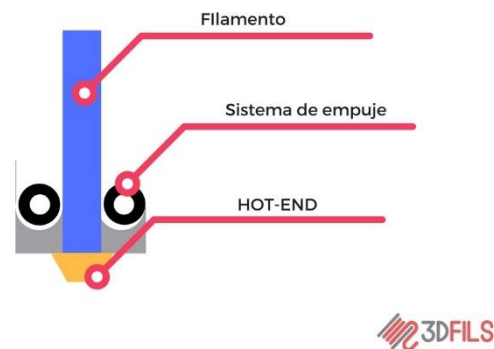


Ilustración 27 Sistema de Extrusión Directa (Fuente: 3D FILS. (2018). "Extrusión directa vs extrusión bowden". Recuperado de: [https://www.3dfils.com/de/blog/18\\_directaobowden](https://www.3dfils.com/de/blog/18_directaobowden))

- Sistema Indirecto o Bowden

Se tiene el sistema de empuje separado del Hotend. La principal ventaja está la reducción de peso que se obtiene en las partes móviles, ya que solo se mueve el Hotend. Por este motivo, la calidad de impresión se puede ver favorecida.

El principal inconveniente es que estos sistemas son más propensos a pequeñas averías, por lo que pueden causar más problemas. Además, no es nada recomendable imprimir materiales flexibles con este sistema. No obstante, a pesar de estos inconvenientes, sólo por el hecho de la reducción de peso en la parte móvil, puede estar justificada su elección según casos. El modelo de impresora 3D del presente trabajo utiliza este tipo de sistema.

### Extrusión Bowden

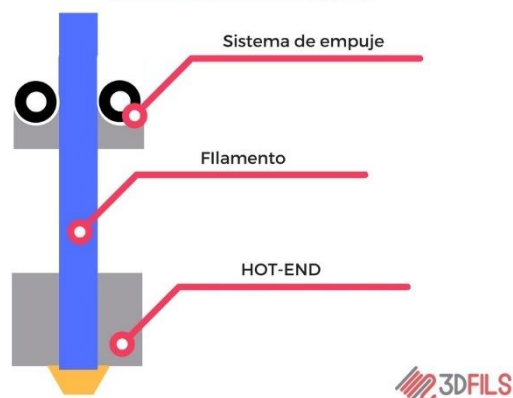


Ilustración 28 Sistema de Extrusión Bowden (Fuente: 3D FILS. (2018). "Extrusión directa vs extrusión bowden". Recuperado de: [https://www.3dfils.com/de/blog/18\\_directaobowden](https://www.3dfils.com/de/blog/18_directaobowden))

- Otros sistemas de extrusión

- Extrusor de pasta o “Paste extruder”

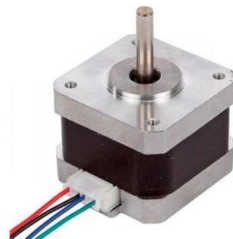
Se utiliza una jeringuilla, la cual extruye o empuja al material (en forma de pasta, en vez de bobina). Este sistema permitiría imprimir con mayor facilidad materiales tan diferentes como el chocolate, puré de patata, yeso, hormigón, arcilla, etc.

- Extrusión mediante tornillo sin fin

En este caso, en vez de usar una bobina de filamento, se deberían de usar pellets.

### 3.5.2 Motor paso a paso

Un motor paso a paso, llamado en inglés “stepper”, es un dispositivo electromecánico que transforma una entrada (impulso eléctrico) en una salida (un giro o desplazamiento angular).



*Ilustración 29 Motor paso a paso. Modelo: NEMA 17 17hs2408 0.6ª. (Fuente: AFEL. Recuperado de: <https://bit.ly/2RnL92x>)*

Los motores paso a paso están compuestos por:

- Estator

Parte estática que contiene las bobinas.

- Rotor

Parte del motor destinada a girar. Está formada por unos imanes (alternando polo norte y sur), que se sienten atraídos cuando las bobinas se imantan mediante corriente eléctrica, produciendo el movimiento.

Hay varios tipos de motores paso a paso:

- De imán permanente

Dentro de este tipo se diferencian:

- Unipolares

Tienen dos pares de bobinas (cuatro bobinas en total).

Son baratos y sencillos de programar, pero tienen muy poca potencia.

- Bipolares

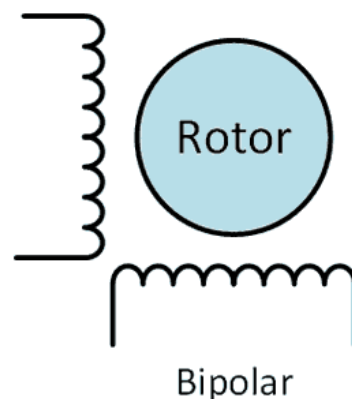
Este tipo de motor paso a paso es el que se suele usar en impresoras 3D.

Sólo tiene dos bobinas. Las bobinas cambian la polaridad durante el movimiento, es decir, la dirección de la corriente se invierte, pasando de campos magnéticos norte-sur a campos magnéticos sur-norte.

- De reluctancia variable

Es el menos común. Se suele usar cuando no se requiere un alto valor de par de fuerza.

Los motores utilizados en este trabajo, para la impresora RepRap Morgan, son los motores paso a paso bipolares, en concreto modelo NEMA 17. “NEMA” es el acrónimo de “National Electrical Manufacturers Association”, que es responsable de muchos estándares relacionados con los motores. Por ejemplo, NEMA 17 significa que mide 1,7 x 1,7 pulgadas.



*Ilustración 30 Esquema de motor paso a paso tipo bipolar (Fuente: Loureiro, J., StaticBoards. “La guía definitiva para comprar los mejores motores paso a paso”. Recuperado de: <https://www.staticboards.es/blog/motores-paso-paso/>)*

### *Terminología referida a motores paso a paso*

- Nº de pasos por vuelta

A mayor nº de pasos mayor precisión se tendrá en el movimiento y posicionamiento. Es muy común en impresoras y robótica utilizar motores de 200 pasos.

- Ángulo por paso

Indica lo que se avanza, en ángulo, por cada paso. En concreto, si se tiene un motor de 200 pasos, el ángulo por paso será de  $1,8^\circ$  (ya que  $360^\circ/200 \text{ pasos} = 1,8^\circ$  por paso).

- Micro-stepping

Permite obtener mayor precisión y movimientos más suaves y fluidos.

Consiste en dividir cada paso de motor en micropasos. Esto se consigue reduciendo la corriente en las bobinas para reducir la fuerza de atracción, por lo tanto, no se realiza el paso por completo. El nº de micropasos depende del Driver que controle el motor. En el ejemplo de este trabajo, se han utilizado “Driver A4988”, los cuales tienen 16 micropasos.

### *Características generales y ventajas de los motores paso a paso*

A modo de resumen, se deben utilizar motores paso a paso en situaciones en las que se requiera un control alto de la posición y la velocidad. Sin embargo, no son recomendables cuando se busca una alta eficiencia energética o una alta velocidad de giro.

#### 3.5.3 Cama caliente

En inglés se le suele denominar Heatbed, término que es muy corriente encontrar también en textos en castellano.

Es un elemento indispensable para imprimir con la mayoría de materiales.

Su funcionamiento es simple. Se trata de un elemento que se calienta, mediante resistencias eléctricas, para que el área de impresión sobre el que se deposita el filamento fundido esté caliente y, de esta forma, hacer que el material se adhiera correctamente a la superficie y evitar que se despegue.

#### 3.5.4 Termistor

Es un sensor de temperatura por resistencia. Presenta un material semiconductor en el que, al variar ligeramente la temperatura, la resistencia varía de forma considerable, haciendo, de esta forma, que sea fácil medir los cambios de temperatura.



*Ilustración 31 Cama caliente / Heatbed (Fuente: <https://bit.ly/2Xn4jv8>)*

Se utiliza para controlar la temperatura tanto en el Hotend del extrusor como en la cama caliente (Heatbed).

### 3.5.5 Final de carrera

En inglés, se le suele denominar Endstop. Este término es muy corriente encontrarlo también en textos en castellano.

Pueden ser de varios tipos:

- Sensor mecánico

Funciona como un interruptor, accionado por un botón.

- Sensor de efecto Hall

Su accionamiento se basa en detectar campos magnéticos, por lo que es preciso colocar un pequeño imán en la zona necesaria, si se quiere utilizar este tipo de sensor.

- Sensor óptico

Detecta la cercanía de un objeto a través del cambio de intensidad de luz.

Generalmente, se suele utilizar un emisor de led infrarrojo y el receptor es un fototransistor.

## 4 Impresora 3D RepRap Morgan

### 4.1 Introducción

#### 4.1.1 Diseño y autor

En primer lugar, destacar y dejar claro que el autor del presente trabajo no es quien inventó y diseñó la impresora RepRap Morgan. Este mérito pertenece a Quentin Harley, a quien se le dedican unas líneas en este apartado.

Esta impresora es “Open Design”, es decir, tiene un diseño libre que permite su utilización y su modificación. La mayoría de las piezas impresas que conforman este modelo se han fabricado mediante el diseño original de Quentin Harley. El único trabajo de diseño que se ha realizado, han sido pequeñas modificaciones mediante Solidworks, en algunas piezas, para adaptarlas mejor a los componentes de los que se disponía o por mejor funcionalidad. Además, también se han diseñado en Solidworks pequeños complementos como soportes o carcasas (para la fuente de alimentación, pantalla, endstops, etc.).

El creador de la impresora 3D RepRap Morgan es Quentin Harley, un ingeniero de Sudáfrica, que se describe así mismo como “Entusiasta de la programación, diseñador de la impresora 3D RepRap Morgan y un miembro orgulloso de la ACL (Anti Cartesian League)”, según su cuenta de Twitter @QuentinHarley.



Harley habla sobre su impresora 3D como “... una herramienta para crear, no un juguete o un producto final en sí mismo. Debería ser usada para formación, y debe ser asequible y segura para que los niños la puedan usar en el colegio” (Fuente: Quentin Harley released SCARA based “RepRap Morgan” 3D printer and its design, 2013).

*Ilustración 32 Quentin Harley, diseñador de la impresora 3D RepRap Morgan (Fuente: <http://www.morgan3dp.com/>)*

#### 4.1.2 Evolución

La impresora 3D RepRap Morgan ha sufrido una evolución desde su prototipo inicial, pasando por varias versiones hasta una versión final muy avanzada, la cual se encuentra a día de hoy comercializada (Fuente: <http://www.morgan3dp.com/>, consultado el 5 de junio de 2019).

A continuación, se muestra la evolución cronológica:

1. Morgan v1 (este documento realiza esta versión)

Creada en enero de 2013, es el primer prototipo del modelo Morgan.



Ilustración 33 Morgan v1 (Fuente: [https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Morgan](https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan))

2. Morgan Pro (creada en junio de 2014)



Ilustración 34 Morgan Pro (Fuente: [https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Morgan](https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan))



### 3. Morgan Mega

Creada en marzo de 2015, es la versión comercial de mayor tamaño.



Ilustración 35 Morgan Mega (Fuente: [https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Morgan](https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan))

### 4. Morgan Pro 2

Creada en diciembre de 2015, es la última versión conocida.



Ilustración 36 Morgan Pro 2 (Fuente: [https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Morgan](https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan))

En este trabajo se ha realizado el montaje de la primera versión (la Morgan v1).

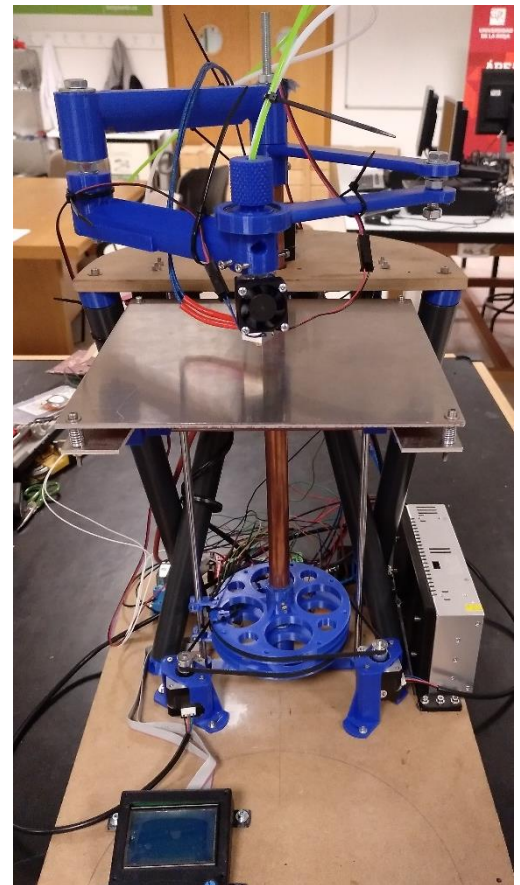
### 4.1.3 Características y funcionamiento general

Como características generales sobre la impresora 3D RepRap Morgan se puede decir que:

Utiliza como método de prototipado rápido el FDM (Modelado por Deposición Fundida), la cual ya ha sido explicada en el apartado “3.2 Métodos de prototipado rápido”.

La configuración de su estructura es una variante de la del robot SCARA (Selective Compliant Assembly Robot Arm), en concreto utiliza la configuración de “SCARA paralela” o “SCARA doble”.

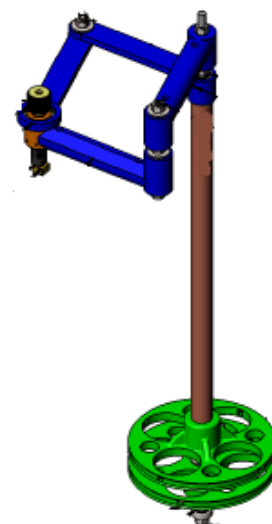
Esta configuración está formada por 5 eslabones (4 eslabones que se ven en la imagen, al que hay que sumar el “eslabón fijo”, que en este caso realmente no es visible ya que ambos brazos parten desde el mismo punto inicial, a distintas alturas).



*Ilustración 37 Impresora RepRap Morgan fabricada durante este proyecto*



*Ilustración 39 Brazos de la configuración SCARA paralela*



*Ilustración 38 Poleas y brazos unidas*

La impresora RepRap Morgan tiene 3 grados de libertad (2 grados de libertad referidos a los 2 brazos de la configuración SCARA paralela y el otro grado referido a la plataforma que sube y baja verticalmente en el eje Z).

Estos 2 grados de libertad de los brazos se pueden demostrar mediante el criterio de Kutzbach, donde “m” es el nº de grados de libertad que viene fijado por:

$$m = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2$$

Donde:

$n$  : es el número de eslabones

$j_1$  : pares con un grado de libertad

$j_2$  : pares con dos grados de libertad

En la impresora RepRap Morgan se tienen 5 eslabones (4 visibles más uno del eslabón fijo) y 5 pares de revolutas (pares de 1 grado de libertad), por lo que sustituyendo se obtiene:

$$m = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot j_1 - j_2 = 3 \cdot (5 - 1) - 2 \cdot 5 = 2$$

Estos 2 grados de libertad más el del eje Z, hacen de la RepRap Morgan una configuración de 3 grados de libertad.

Sobre el funcionamiento general de la impresora, hay que explicar que los brazos son movidos por dos poleas, cada una de ellas unida a un motor NEMA 17, mediante correas. Cada polea mueve un brazo, ya que una de las poleas va unida solidariamente al tubo de cobre y éste, a su vez, va unido en el otro extremo a uno de los brazos, de forma que el giro en esa polea se transmite mediante el tubo de cobre a uno de los brazos. En el caso de la otra polea, ésta transmite el movimiento a una varilla roscada (que va por dentro del tubo de cobre). En este caso también van unidas solidariamente la polea y la varilla roscada y, también, esta varilla roscada va unida solidariamente al otro brazo.



*Ilustración 40 Poleas y correas RepRap Morgan*

En cuanto a la plataforma con la cama de impresión ésta se mueve verticalmente mediante un husillo movido por un motor situado en la plataforma superior.

#### 4.1.4 Modificaciones respecto al diseño original y piezas complementarias

En este apartado se agrupan piezas del diseño original que han recibido cambios de diseño y piezas complementarias que han sido diseñadas o modificadas, las cuales no tienen una gran relevancia para el funcionamiento de la máquina, pero sí son de gran utilidad.

Todas estas piezas pueden ser vistas en detalle en los planos de los Anexos.

A continuación, se nombran y comentan:

- Bases inferior y superior

En los planos de estos elementos se especifican las dimensiones que permiten cortar y taladrar las bases, tanto inferior como superior.

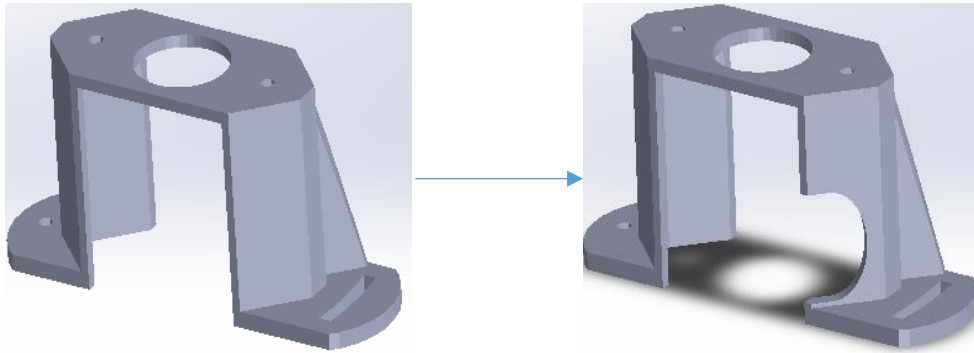
No se ha realizado el mismo corte que el diseño original, ya que se ha preferido conservar más superficie de madera para poder fijar en ella elementos como la pantalla LCD. Hay que recalcar que en el plano se han especificado los agujeros esenciales para el correcto montaje, obviando agujeros relativos a carcasas o complementos u otros no esenciales/críticos, dejando éstos a criterio propio, ya que da igual dónde se coloquen (ver en planos Anexos).

- Placas de aluminio inferior y superior

Se ha realizado un diseño de calibrado de la superficie de impresión mediante muelles, adaptando estas dos placas a la impresora mediante las piezas impresas de apoyo y, además, realizando un diseño que permita aligerar peso en la medida de lo posible. En los planos anexados se puede tomar nota de las dimensiones.

- Soportes de motores alto y bajo

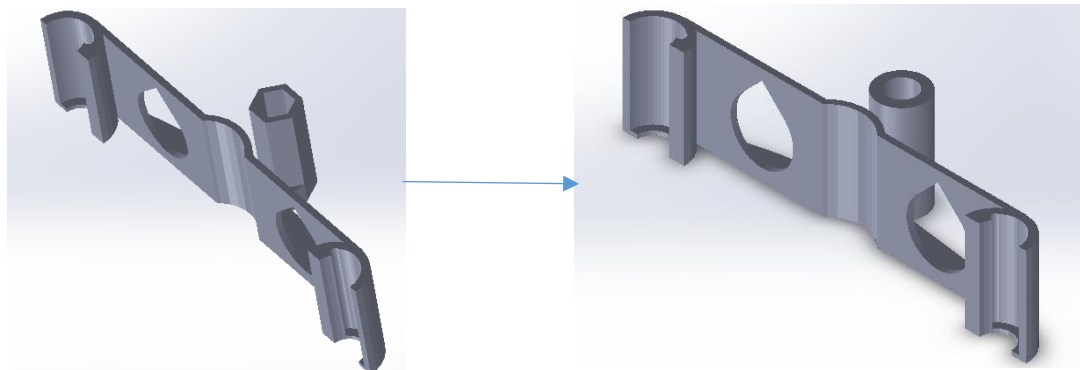
Al imprimir las piezas con el diseño original, se percibió que la clavija de conexión de los motores chocaba y no dejaba un correcto ajuste; por tanto, se modificaron ambas piezas para hacer una abertura en cada una que permitiera a las clavijas conectarse con cada motor (ver en planos Anexos).



*Ilustración 41 Modificación soporte pequeño motor*

- Soporte husillo plataforma de impresión

Para el husillo, encargado de mover la plataforma de impresión en el eje Z, no encajaba correctamente la pieza de unión del husillo con el soporte de la plataforma de impresión. Por tanto, se modificó el enganche para atornillar el husillo de una geometría hexagonal a una cilíndrica.



*Ilustración 42 Modificación en el soporte husillo plataforma impresión*

- Carcasa de pantalla LCD

Se puede encontrar en planos el diseño de una carcasa para la pantalla LCD, la cual se puede fijar a la base mediante tornillos.

- Soportes para Endstops mecánicos (finales de carrera)

En caso de usar finales de carrera mecánicos, se puede encontrar un diseño para estos en los planos de Anexos.

- Carcasa de fuente de alimentación

Se realizó una pieza para fijar la fuente de alimentación a la base de madera, mediante tornillos (ver planos en Anexos).

#### 4.1.5 Ventajas y desventajas de la impresora RepRap Morgan

Una de las principales ventajas de la impresora RepRap Morgan es su configuración híbrida (SCARA paralela), la cual combina características de las configuraciones de robots seriales con las ventajas de los robots de configuración paralela.

Una de las desventajas que suelen tener los robots seriales es su pequeño espacio de trabajo. Sin embargo, en el caso de la impresora RepRap Morgan, el espacio de trabajo es igual a una SCARA normal, a excepción del posible contratiempo que supone el peso extra de un doble brazo. Sin embargo, la configuración de SCARA paralela tiene una gran ventaja respecto a la SCARA normal, ya que los errores de posición no son acumulativos, como un robot de eslabones en serie. Por tanto, al mover cada brazo de forma independiente mediante dos robots situados en el comienzo de los brazos, se disminuye el error en la posición; mientras que, en el caso de tener sólo un brazo y mover los diferentes eslabones con motores que van moviendo cada eslabón y añadiendo, al posible error de este eslabón, el error del movimiento del eslabón anterior, el error final es mayor debido al error acumulativo.

Otra ventaja de esta impresora es que permite impresiones de gran altura y, además, sería muy fácil modificarla para alcanzar alturas de impresión aún mayores; sólo haría falta utilizar tubos de PVC más largos y un husillo o varilla roscada en el eje Z con suficiente longitud para permitir bajar a la plataforma de impresión lo suficiente.

Hay que mencionar que esta impresora, actualmente, tiene desventajas respecto a las impresoras de tipo Cartesianas y Delta. Éstas son mucho más comunes y generalizadas, por lo que existe en internet mucha más información al respecto, mayor disponibilidad de recambios, posibilidad de firmwares actualizados y concretos a cada impresora. Además, en el caso de las impresoras cartesianas, suelen ser más fáciles y rápidas de montar. En algunas empresas, venden kits premontados cuyo montaje es muy rápido.

Otra desventaja, es el excesivo momento de fuerza que ejerce el peso del extrusor con los brazos de la impresora extendidos en el punto más lejano del área de impresión, lo cual podría ser un factor limitante de cara a hacer una impresora con mayor área de impresión. Para solucionar esto, ya se realizan medidas como poner un sistema de extrusión tipo

Bowden para aligerar peso y, en caso de problemas por unos brazos muy largos, se podría cambiar el material de éstos, de PLA a otro material más resistente.

Por último, desde el punto de vista del área de las impresoras domésticas y de la afición a éstas, la innovación y rareza que esta impresora supone frente a la mayoría de las utilizadas actualmente, podría ser suficiente motivo para su elección.



## 4.2 Lista de materiales

Para acceder al listado completo con todas las piezas necesarias, mirar en Anexos.

Los materiales/piezas necesarias para realizar la impresora se han dividido en dos subgrupos:

- Piezas impresas (piezas replicables)  
Son todas las piezas de la impresora, las cuales han sido realizadas mediante otra impresora 3D. Estas piezas han sido impresas en PLA, un material que es un polímero formado por moléculas de ácido láctico.
- Componentes (piezas no replicables)  
Este subgrupo está formado por todas las piezas que no han sido impresas, las cuales son: tornillería, tubos de PVC, tubos de cobre, electrónica, etc.

Sobre las piezas elegidas, añadir que se pueden elegir otros materiales o piezas, dependiendo de factores económicos, disponibilidad, objetivos, uso, etc.; por tanto, esta lista de materiales que se presenta aquí, es modificable a conveniencia de cada persona.

## 4.3 Procedimiento para imprimir las piezas replicables

En este apartado se explican los pasos que se deben seguir para imprimir las piezas replicables de la impresora RepRap Morgan, es decir, todas las partes impresas en 3D de la máquina.

### *1 Archivos en la extensión “.stl”*

Es necesario tener cada pieza que se va a fabricar, mediante impresión 3D, en un fichero en con extensión “.stl”, que es un formato CAD muy usado en impresión 3D, ya que define la geometría 3D de la pieza pero excluye parámetros más irrelevantes en este campo como el color, la textura, etc. Es posible descargarse los ficheros “.stl”, con las piezas originales, en la página web GitHub en el perfil de Quentin Harley: <https://github.com/qharley/Morgan/tree/master/stl>.

Por otro lado, es posible visualizar en los planos de los Anexos, las piezas impresas a las que se les han realizado pequeñas modificaciones en Solidworks, así como otras piezas impresas tales como carcasas, soportes, etc.



## 2 Software Cura

Para poder imprimir las piezas que constituirán una parte importante de la impresora RepRap Morgan, es necesario instalar en el ordenador un software que realice el laminado de una determinada pieza 3D que se introducirá en el programa en formato “.stl” y, de esta forma, generar un archivo en “.gcode” que contendrá las instrucciones que harán funcionar la máquina correctamente para la creación de la pieza en 3D.

Mediante el software Cura se modifican los parámetros de impresión (éstos cambiarán en función de qué impresora se vaya a utilizar y el acabado final que se quiera para la pieza a fabricar) y, después, se transforma en un código G (G-code) que hará que se imprima la pieza correctamente.

En este apartado se van a explicar los pasos con el software utilizado en este proyecto, el “Cura”, pero queda a libre elección utilizar cualquier otro de los softwares disponibles que realizan la misma función, como, por ejemplo: Slic3r, Repetier-Host, etc.

Una vez instalado el software Cura (no tiene mayor complicación, mirar en internet en caso de duda), a continuación, se detallan los pasos que hay que realizar para utilizar este programa y convertir las piezas a instrucciones de código G.

Al abrir el programa se visualiza en la pantalla un menú como en la ilustración 43, donde por un aparece una simulación del área de impresión y en la parte de la derecha un desplegable donde se configurarán los parámetros de impresión.

Lo primero a realizar es añadir la impresora con la que se van a fabricar las piezas que se están configurando, por lo que hay que clicar en “Settings” → “Printer” → “Add Printer”. En el caso particular, las piezas se han hecho con una impresora modelo “Prusa i3 MK2S”.

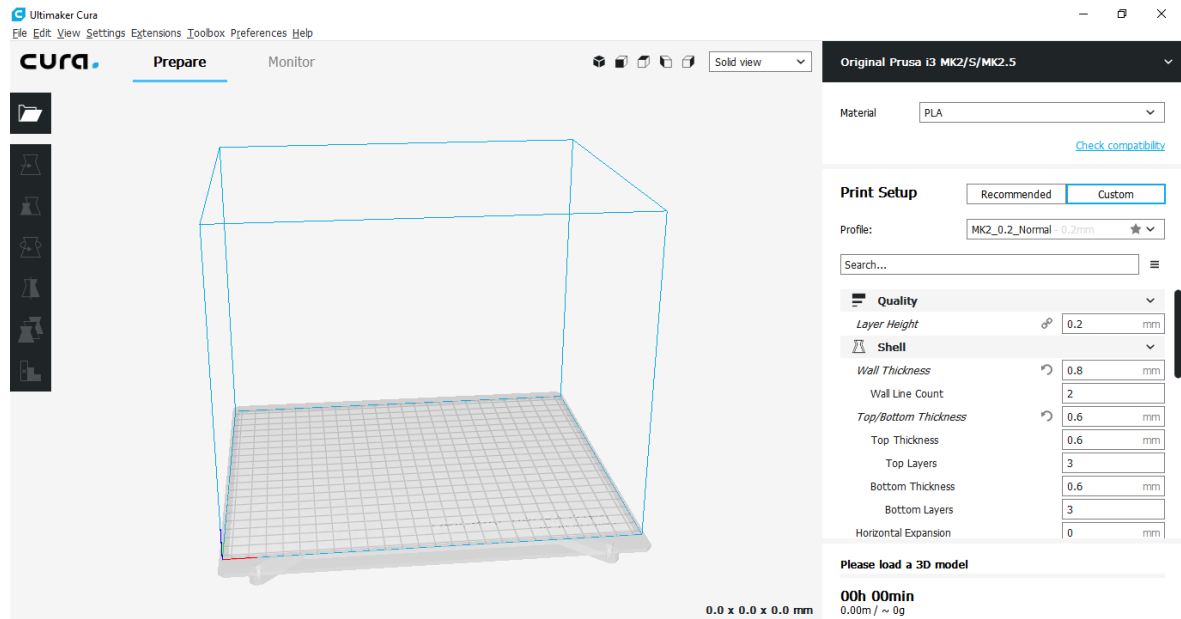


Ilustración 43 Visualización al abrir el Cura

Es necesario “arrastrar” las piezas en 3D (en el formato “.stl”) que se quieran imprimir sobre el área de impresión. Se pueden colocar varias piezas, tantas como quepan en el área de impresión real.

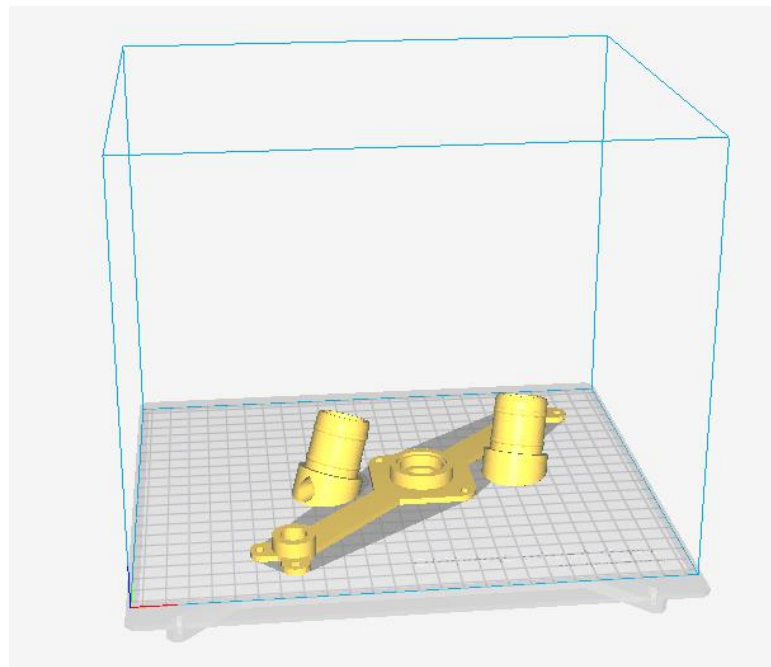


Ilustración 44 Ejemplo piezas a imprimir

A continuación, se tienen que elegir y configurar parámetros de impresión. En las fotos del margen derecho se visualizan los parámetros elegidos. Además, a continuación, se comentan y explican algunos de los parámetros más importantes:

- Tipo de material: PLA
- Layer Height (Altura de capa): 0.2  
Es un parámetro muy importante. Cuanto menor sea la altura de capa mayor resolución tendrá la pieza, aunque, por ende, requerirá más tiempo.
- Wall Thickness (Grosor de la pared): 0.8  
Este parámetro tiene que ser múltiplo del diámetro de la boquilla
- Top/Bottom Thickness (Grosor de la capa superior e inferior de la pieza): 0.6  
Son capas que por defecto van a tener densidad 100%.
- Infill Density (Densidad de relleno): 50%  
Se trata de la densidad de material que tendrá la pieza en su interior. Si se necesita mucha resistencia se optará por una alta densidad, mientras que en el caso de figuras artísticas o que no sean comprometidas, se podrá utilizar una densidad baja ( $\approx 20\%$ ).
- Infill Pattern (Patrón de relleno)  
Se selecciona el tipo de movimiento que se quiere que realice el extrusor al rellenar la pieza de material (líneas, triángulos, zigzag, etc).
- Printing Temperature (Temperatura de impresión): 215°C  
Fija la temperatura del Hotend.
- Build Plate Temperature (Temperatura de la cama caliente): 65°C

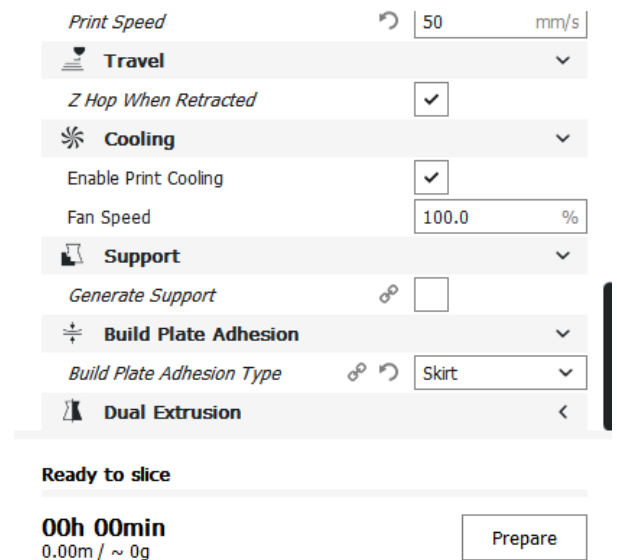


Ilustración 45 Parámetros 1 Cura

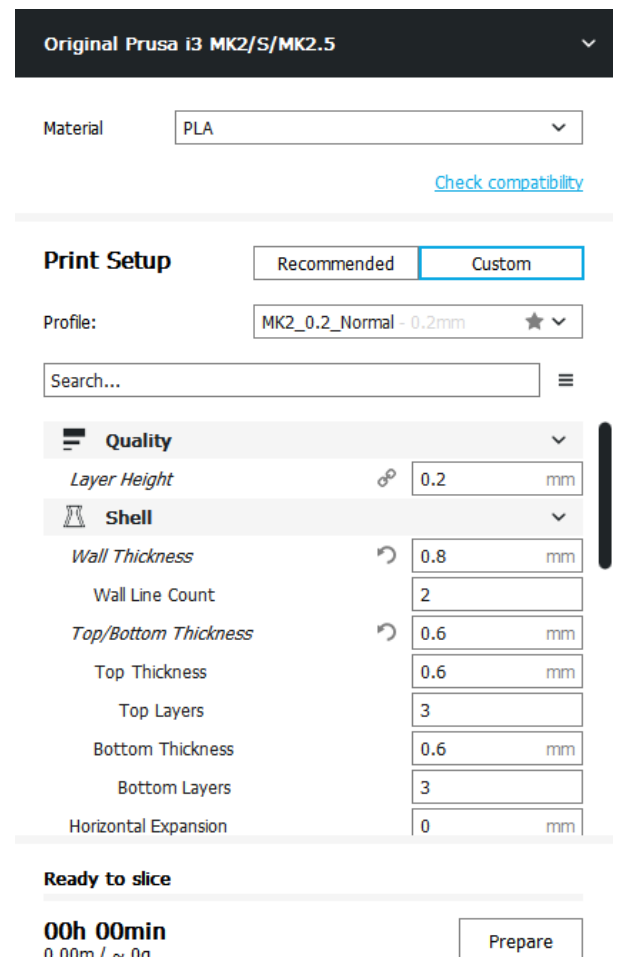
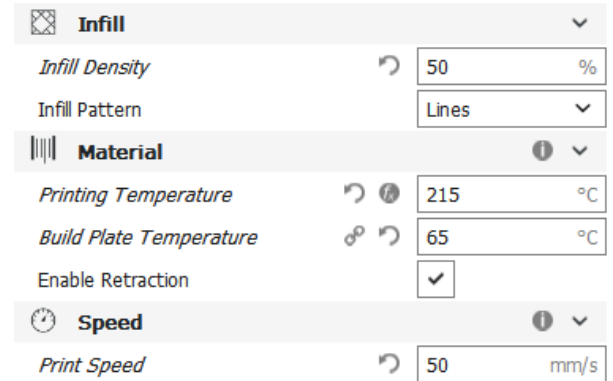


Ilustración 46 Parámetros 2 Cura

- **Enable Retraction (Habilitar retracción)** Se recomienda activarla. Sirve para evitar goteos de plástico en los desplazamientos del extrusor.
- **Print Speed (Velocidad de impresión):** 50 mm/s  
Un aumento excesivo de la velocidad ahorra tiempo pero disminuye la calidad.
- **Support (soporte)**  
Habrá que seleccionar la opción de generar soporte en aquellas piezas que tengan partes “en el aire”, las cuales sin material de soporte no pueden ser fabricadas
- **Build Plate Adhesion (Adhesión al área de impresión).** Presenta diferentes opciones que preparan la extrusión y la adhesión a la cama caliente.




Infill	
Infill Density	50 %
Infill Pattern	Lines

Material	
Printing Temperature	215 °C
Build Plate Temperature	65 °C
Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>

Speed	
Print Speed	50 mm/s

Ilustración 47 Parámetros 3 Cura

Una vez configurados estos parámetros, se pulsa el botón “Prepare” para que el software haga los cálculos de cuánto tiempo y material va a emplearse, según los parámetros seleccionados anteriormente.



Ready to slice

**00h 00min**  
0.00m / ~ 0g

Prepare

→

Ready to Save to Removable Drive

**04h 26min**  
13.45m / ~ 40g

Save to Removable Drive

Ilustración 48 Preparar y guardar en Cura

En el caso del ejemplo de este trabajo ha sido un tiempo de 4 horas y 26 minutos, así como 40 gramos de filamento de PLA.

Por último, habría que guardar el archivo en el dispositivo de memoria (tarjeta SD, micro-SD, USB, etc.) que acepte la impresora donde se van a fabricar las piezas e introducir este dispositivo en el lugar habilitado en la impresora 3D que se disponga y, por último, imprimir.

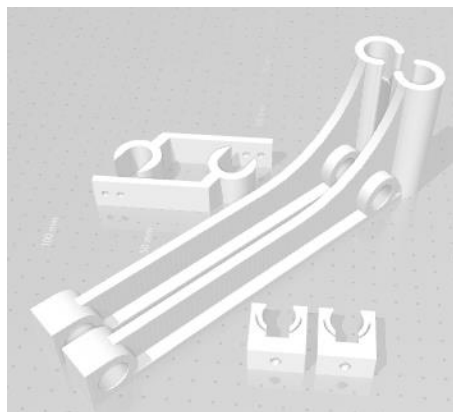
## 4.4 Montaje Hardware

Para comenzar el montaje es necesario tener impresas las piezas replicables, lo cual se explica en el apartado anterior. Por otro lado, hay que cortar los tubos de cobre y PVC a las medidas que se especifican en la lista de materiales.

Una vez que se tienen todas las piezas y materiales preparados se puede comenzar el montaje.

Para realizar el montaje se han utilizado diferentes herramientas: sierra de calar (opcional), sierra manual, tornillo de banco, llaves Allen, llave inglesa, soldador de estaño, destornilladores de estrella y planos, martillo de bola, martillo de goma, regla, calibre, taladro, cinta adhesiva Kapton, etc.

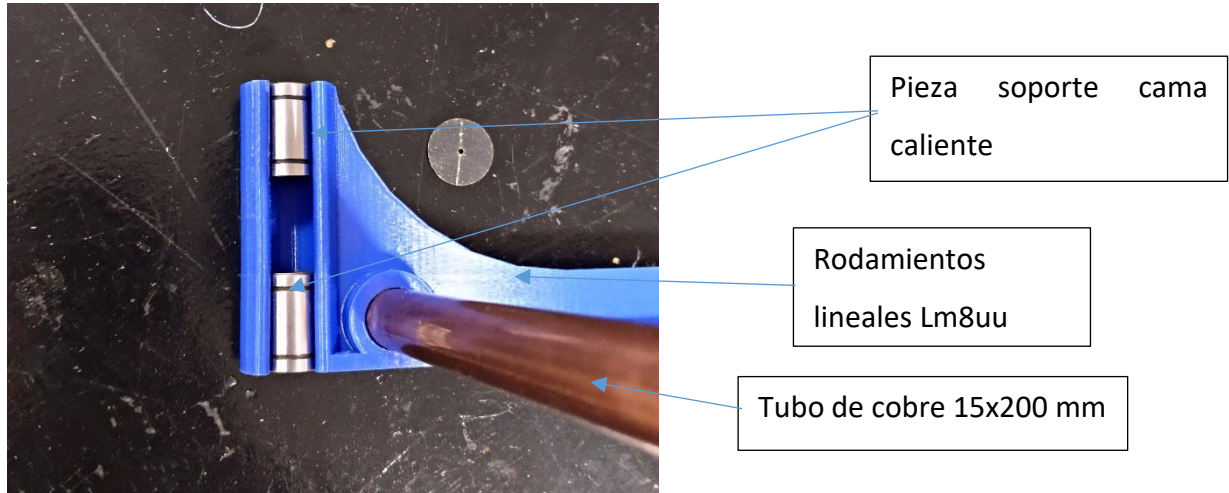
### 4.4.1 Montaje plataforma de impresión



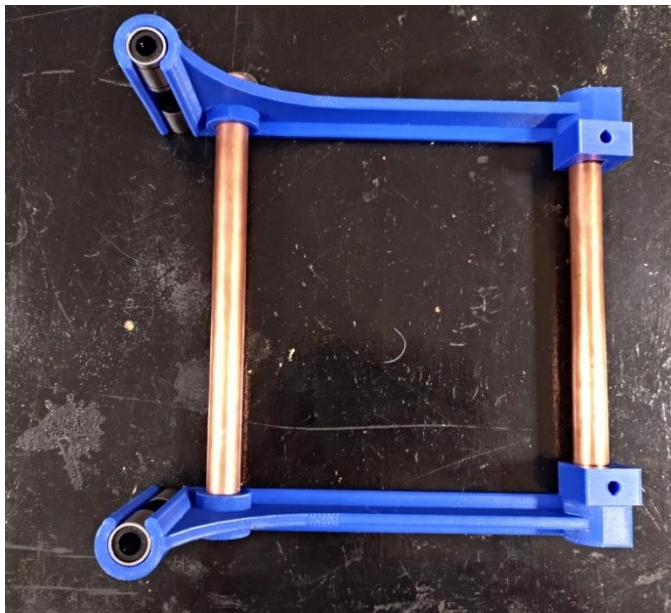
*Ilustración 49 Piezas plataforma impresión*

En primer lugar, es necesario introducir los rodamientos lineales “Lm8uu” en las dos piezas soporte de la cama caliente, tanto en la pieza soporte izquierdo con el soporte derecho, por lo que, en total, para esta parte se requerirán cuatro de los rodamientos lineales antes mencionados.

El siguiente paso es unir los dos soportes de la cama caliente mediante los dos tubos de cobre de diámetro 15 mm y longitud 200 mm.

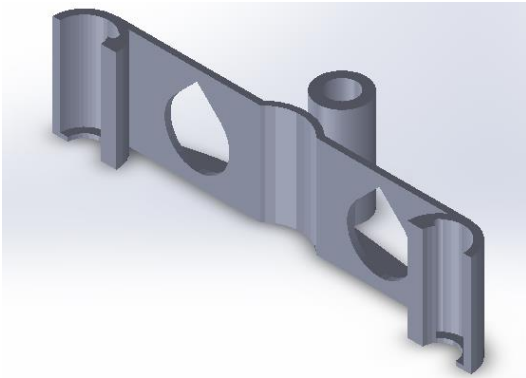


*Ilustración 50 Colocación rodamientos Lm8uu en soporte cama caliente*



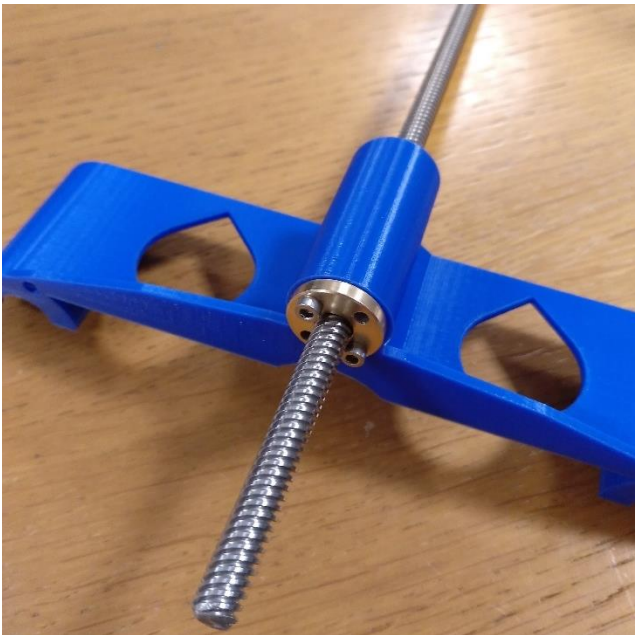
*Ilustración 51 Montaje soporte cama caliente*

A este soporte de la cama caliente hay que añadirle el soporte al que va atornillado el husillo que moverá la plataforma de impresión en el eje Z.



*Ilustración 52 Soporte husillo plataforma impresión*

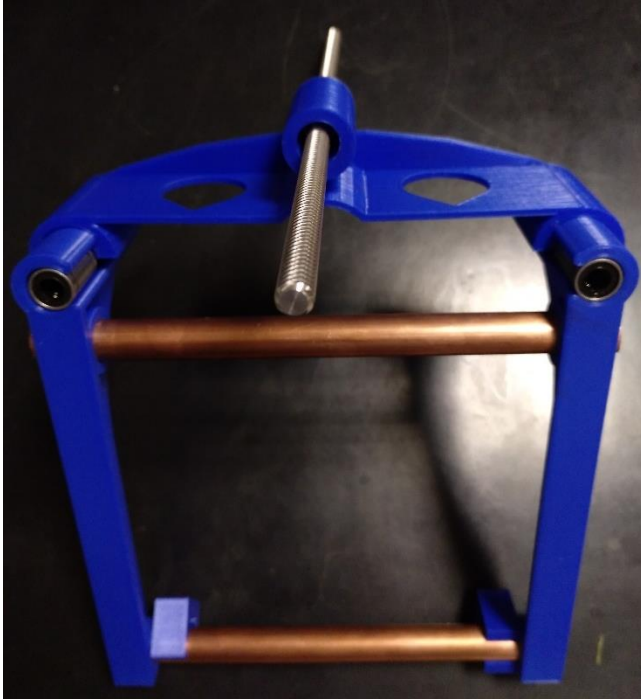
Se atornilla el husillo al soporte. Para mayor precisión se ha utilizado una tuerca anti-backlash (antiretroceso). El modelo es tuerca anti-backlash T8x8.



*Ilustración 53 Fijación atornillado husillo y soporte plataforma de impresión*

El montaje esperado es:





*Ilustración 54 Montaje plataforma de impresión*

A esta estructura se le deben añadir las dos placas de aluminio, las cuales sirven para calibrar la inclinación del área de impresión mediante un sistema de muelles.

Las placas de aluminio fueron cortadas en dos cuadrados de 222x222x3 mm, a los que después se les realizó los agujeros correspondientes mediante taladro y, además, a la placa de aluminio inferior se le realizaron unos cortes para aligerar peso. Las dimensiones para taladrar y cortar se pueden ver en los planos de los Anexos.



*Ilustración 55 Placas de aluminio cortadas con plegadora (222x222x3)*

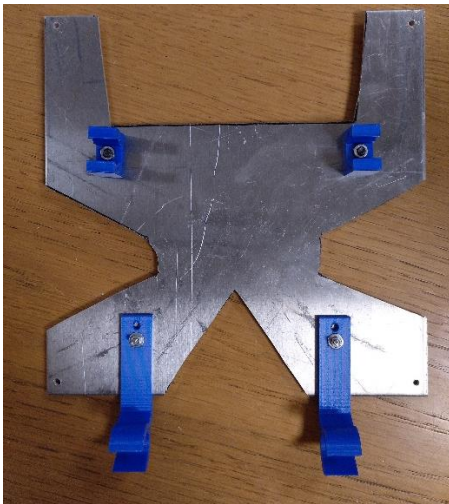


La placa de aluminio inferior se corta para aligerar peso:



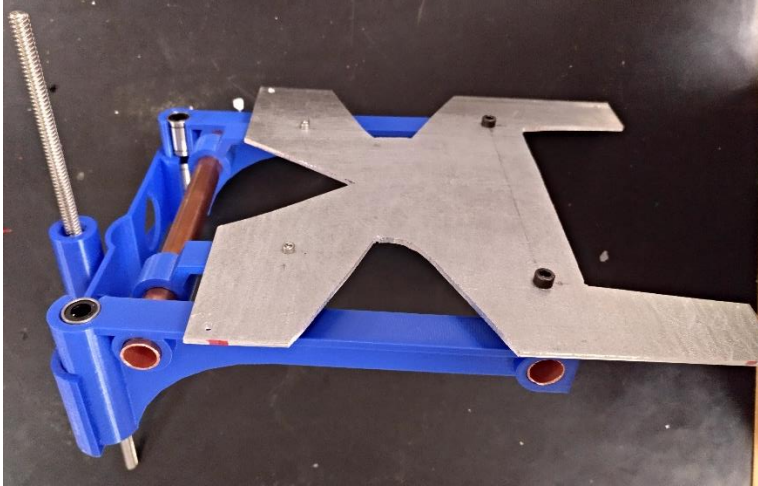
*Ilustración 56 Placa de aluminio inferior cortada para aligerar peso*

A continuación, se atornillan los cuatro apoyos (dos apoyos delanteros con tornillos M5 y dos apoyos traseros con tornillos M4):



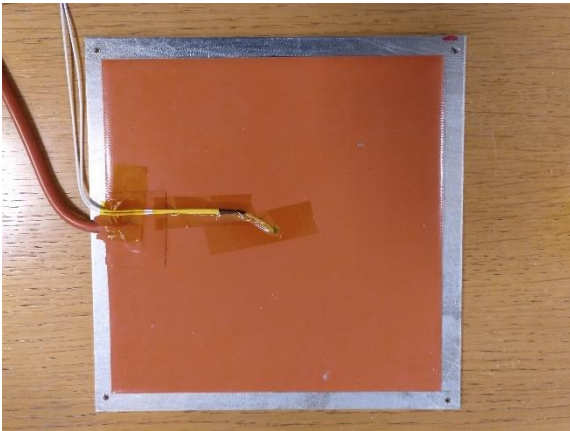
*Ilustración 57 Apoyos fijados a placa de aluminio inferior*

El siguiente paso es colocar los apoyos sobre los tubos de cobre. Los dos apoyos delanteros van sujetos por apriete con el tubo y los dos apoyos traseros simplemente “descansan” sobre el otro tubo de cobre.



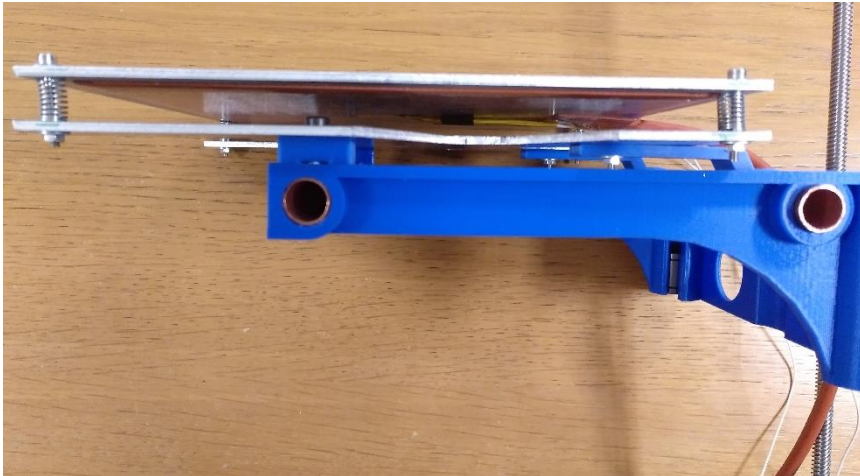
*Ilustración 58 Placa de aluminio inferior sobre plataforma de impresión*

En la placa de aluminio superior, hay que colocar la cama caliente (“Heatbed”), para lo cual hay que retirar una lámina adhesiva que viene de fábrica y colocarla en la posición correcta. Además, es necesario colocar el termistor para medir la temperatura que aporta el Heatbed, el cual se coloca en el agujero central de la placa de aluminio superior, mediante cinta adhesiva Kapton.



*Ilustración 59 Heatbed pegado en la placa de aluminio superior*

Las dos placas de aluminio se juntan mediante un sistema de muelles:



*Ilustración 60 Placas de aluminio unidas mediante sistema de muelles*

Encima de la placa de aluminio superior, se colocaría un cristal de 222x200x3 mm sujeto mediante unas pinzas de “pala abatible” (típicas de material de oficina) pero este paso no se realizará hasta tener el montaje de la estructura de la impresora completo.

#### 4.4.2 Montaje sistema de empuje MK8 Bowden

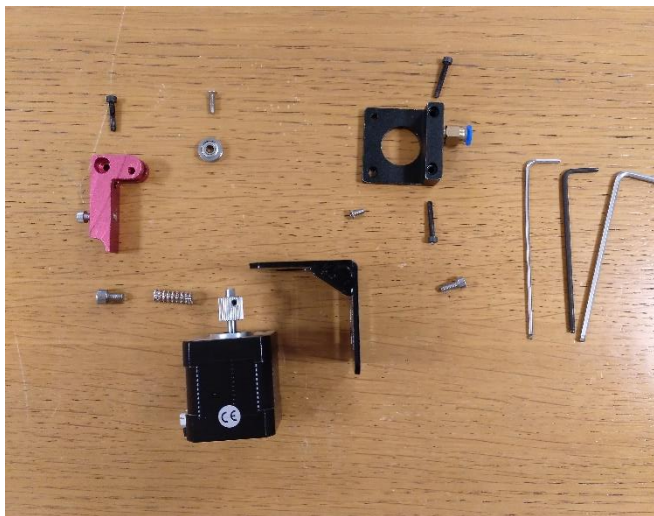
Para el sistema de empuje, el cual moverá el filamento hasta el Hotend del extrusor, se ha utilizado un motor con más torque, ya que es un motor paso a paso Nema 17 - 5.5Kg/cm (en lugar de tener un torque de 4.4 kg/cm como en el caso de los tres motores restantes encargados de mover los dos brazos y la plataforma de impresión en el eje Z), de forma que se asegura que el motor será capaz de mover la bobina de filamento correctamente. Hay que comentar/avisar que este sistema no es apto para filamento de material flexible.

Para realizar el montaje de este sistema de empuje se ha utilizado:

- 1 x Motor paso a paso Nema 17 - 5.5Kg/cm
- 1 x Polea T2.5 16 dientes 5mm
- El kit del sistema de empuje MK8 Bowden, compuesto por:
  - 1 x Rodamiento U-groove FZ0463
  - 2 x Piezas de aluminio (negra y morada) que conforman el sistema de empuje
  - 1 x Soporte metálico en 90º para motor Nema 17
  - 2 x Racord 1.75mm
  - 1 x Tornillo cabeza plana 3x8mm para sujeción pieza morada
  - 1 x Tornillo cabeza plana 3x10mm (para sujeción U-Groove

- 1 x Tornillo 3x16mm para pieza morada
- 1 x Tornillo 5x8mm para muelle (parte superior)
- 1 x Tornillo 4x16mm para muelle (parte inferior)
- 1 x Tornillo 4x20mm para apretar el muelle (parte superior pieza morada)
- 1 x Muelle 20x5mm
- 1 x Extrusion Gear MK7
- 1 x Extrusion Gear inner 5mm, outer 12mm.
- 4 x Tornillo 3x16mm para sujeción del soporte del motor al chasis de la impresora
- 4 x Arandela M3 para sujeción del soporte del motor al chasis de la impresora
- 4 x Tuerca M3 para sujeción del soporte del motor al chasis de la impresora
- 1 x metro de tubo PTFE 1.75mm

Los elementos sin montar se pueden ver en la siguiente ilustración:

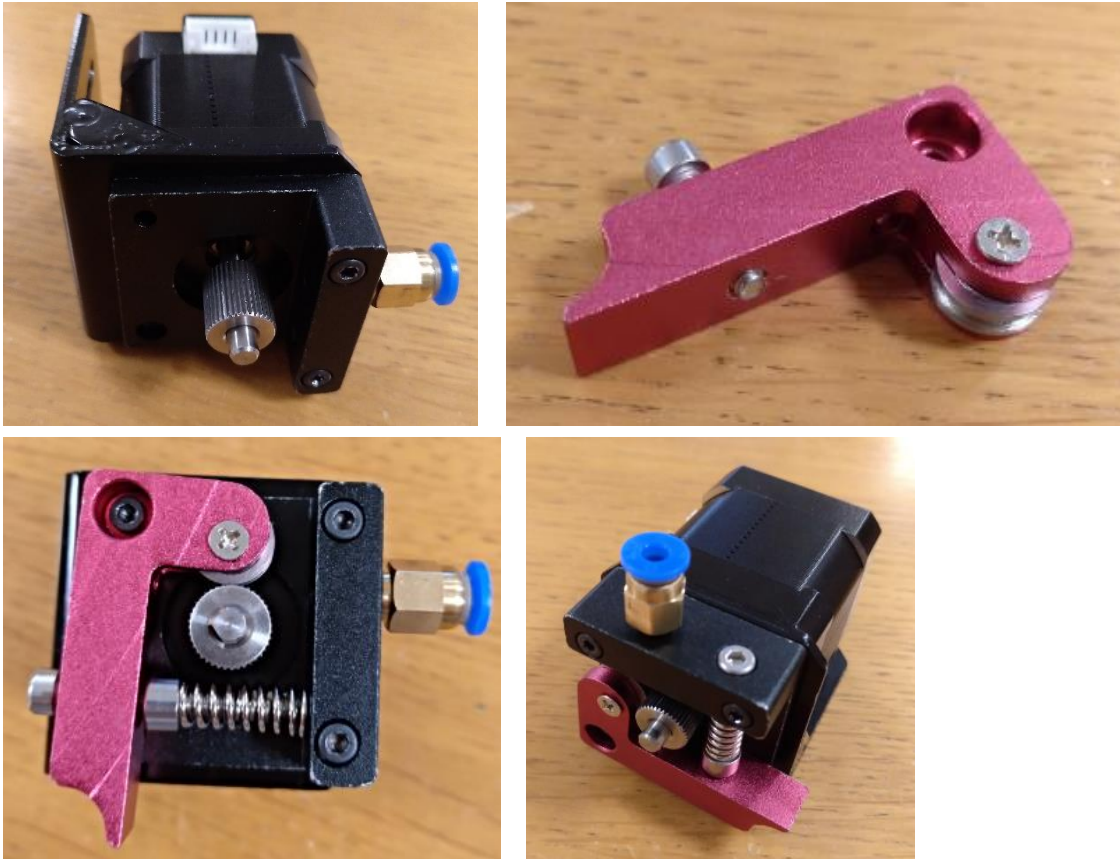


*Ilustración 61 Componentes sistema de empuje MK8 Bowden*

Para el apriete de los tornillos se han utilizado llaves Allen de las medidas correspondientes.

En primer lugar, se acopla en el eje del motor paso a paso la “Polea T2.5 16 dientes 5mm”. El siguiente paso es atornillar el motor paso a paso, el soporte metálico en 90º y la pieza de aluminio negra. Sobre esta pieza negra se coloca la pieza de aluminio morada con el rodamiento. Por último, se coloca el muelle y se tensa o destensa según se apriete el tornillo que lo sujeta.

A continuación, se adjuntan unas fotos explicativas de los siguientes pasos a realizar:



*Ilustración 62 Montaje sistema de empuje MK8 Bowden*

Por último, se atornilla en la base superior, en un lugar adecuado para poder llevar el filamento hasta el Hotend mediante un tubo PTFE.

#### 4.4.3 Montaje Hotend E3D V6

El montaje del Hotend se puede explicar en los siguientes pasos:

- 1) Unir la boquilla (Nozzle) con el bloque calentador (Heat Block):



*Ilustración 63 Boquilla y bloque calentador del Hotend*

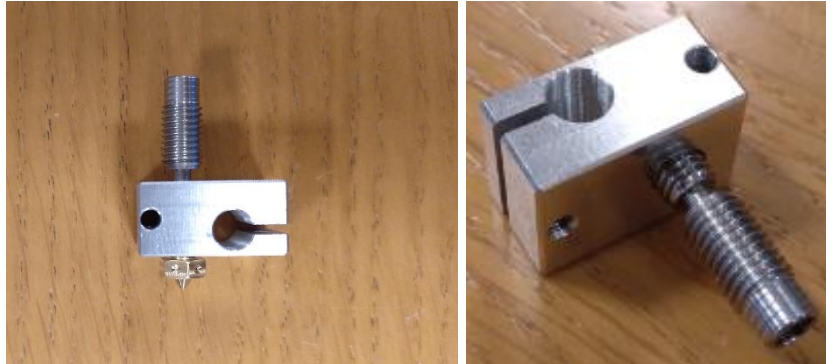


Es importante asegurarse, antes de atornillar la boquilla, de que el bloque calentador está colocado en la orientación correcta.



*Ilustración 64 Atornillado de boquilla y bloque calentador*

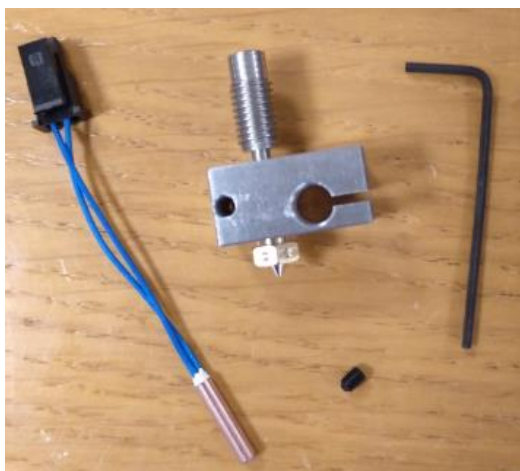
## 2) Atornillar la pieza de rotura de calor (Heat Break)



*Ilustración 65 Atornillado del disipador de calor*

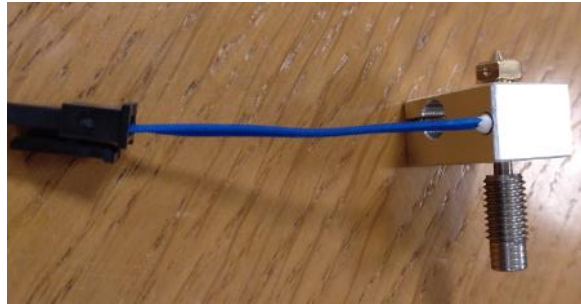
## 3) Conexión de las partes del termistor

Para este paso hacen falta las siguientes piezas:



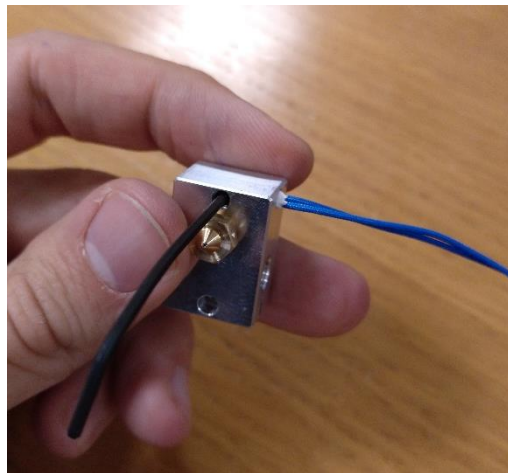
*Ilustración 66 Piezas unión termistor del Hotend*

Se introduce el termistor como en la siguiente ilustración:



*Ilustración 67 Inserción del termistor en el bloque calentador*

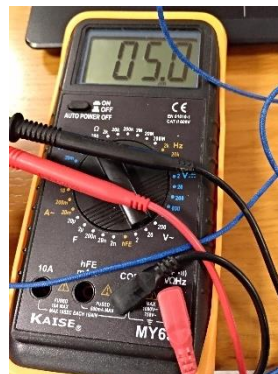
Se atornilla el tornillo prisionero de métrica 3 mediante la llave Allen:



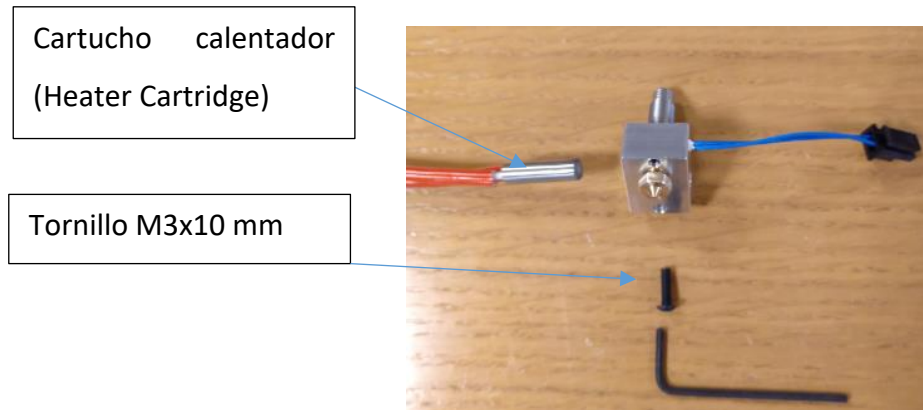
*Ilustración 68 Fijación del termistor mediante tornillo prisionero M3*

#### 4) Cartucho calentador (Heater Cartridge)

En primer lugar, se realiza una comprobación con el multímetro. Para un cartucho calentador de 12V 30W, se debería marcar en el multímetro un resultado de 4.8  $\Omega$ . Se realiza la prueba, obteniéndose 5.0  $\Omega$ , lo cual se considera como un resultado razonable.

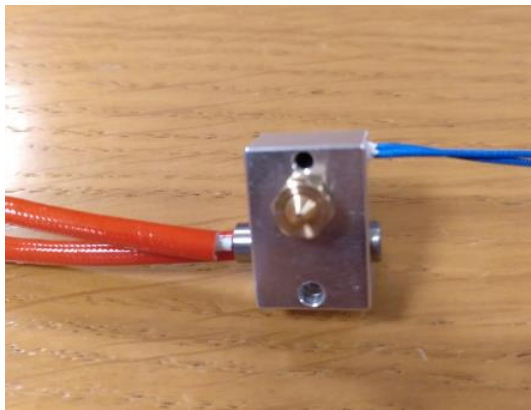


*Ilustración 69 Comprobación del cartucho calentador mediante multímetro*



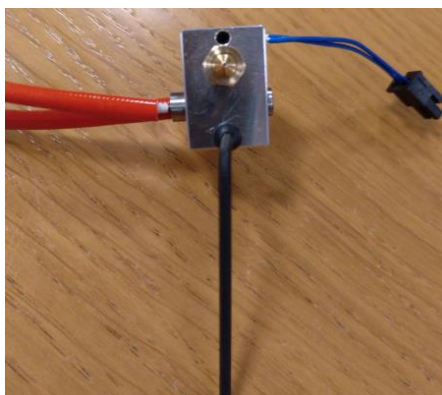
*Ilustración 70 Componentes montaje cartucho calentador (Heater Cartridge)*

Se debe introducir el cartucho calentado:



*Ilustración 71 Inserción cartucho calentador*

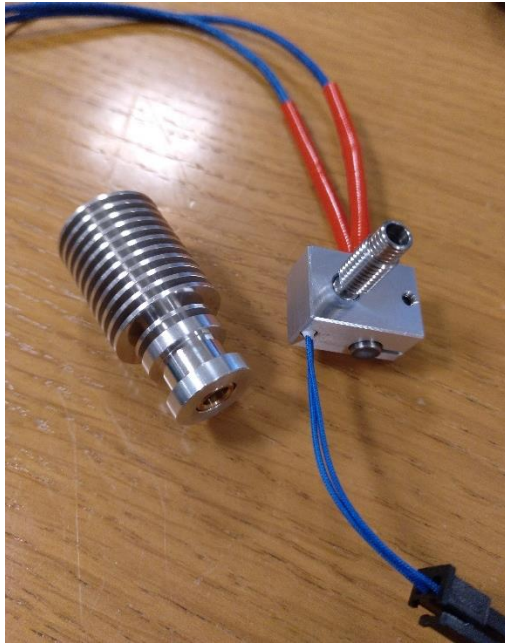
Por último, se atornilla el tornillo M3x10 mm para fijar el cartucho calentador, asegurando mediante un pequeño tirón del cable que éste está correctamente sujeto:



*Ilustración 72 Atornillado del M3x10 mm*

## 5) Unión del disipador de calor (Heat Sink)

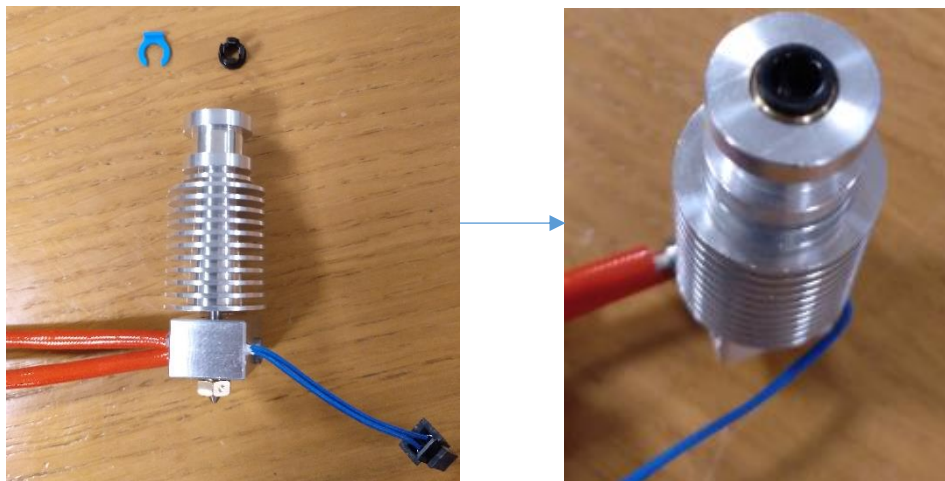




*Ilustración 73 Unión del disipador de calor al Hotend*

Se puede aplicar sobre la rosca de la pieza de rotura de calor un compuesto termal en forma de pasta. No se debe aplicar esta pasta en ningún otro lugar.

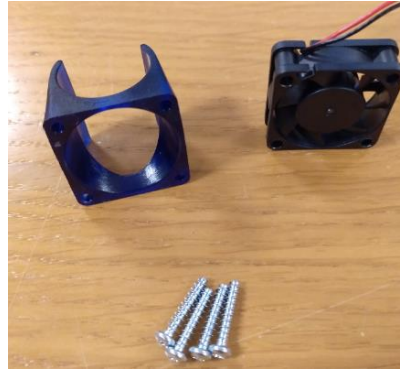
La corona (pieza negra) se coloca a presión, mientras que el clip de la corona (pieza azul) se pone una vez se haya metido el tubo PTFE dentro de la corona.



*Ilustración 74 Inserción de la corona unión con tubo PTFE*

## 6) Ventilador del Hotend

Para montarlo, se requiere del ventilador, el soporte y 4 tornillos como se ven en la imagen:



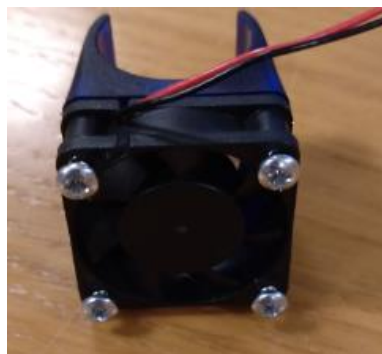
*Ilustración 75 Montaje ventilador del Hotend*

El primer paso es atornillar parcialmente los tornillos, asegurándose que las cabezas de los tornillos no estén en el lado por el que se emite el flujo de aire.



*Ilustración 76 Atornillado parcial de ventilador*

Después, se coloca el soporte y se atornilla:



*Ilustración 77 Montaje terminado del ventilador del Hotend*

Se fija a presión el ventilador sobre el disipador de calor:

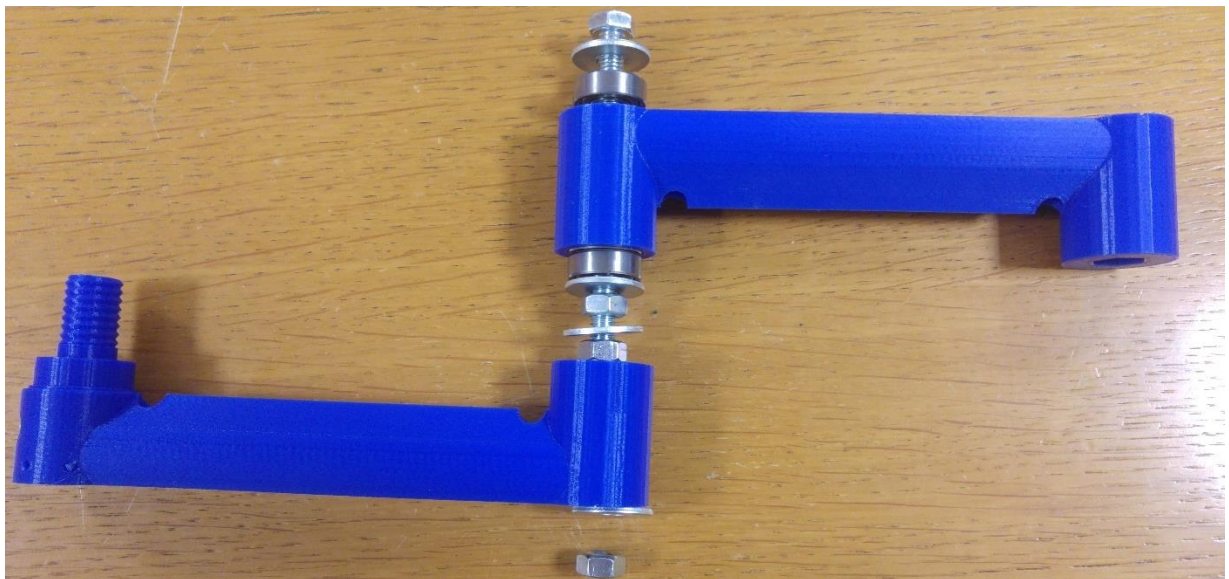


*Ilustración 78 Montaje del ventilador sobre el disipador de calor*

El montaje del Hotend estaría parcialmente terminado, a falta de conectar las extensiones de cable, mediante los enganches que vienen de fábrica, poner los protectores térmicos y ajustarlo y colocarlo correctamente en la impresora 3D, así como ajustes de firmware.

#### 4.4.4 Montaje brazos

En la “ilustración 79” se puede ver el montaje de un brazo (el arm PSI), con los elementos de tornillería y rodamientos sin colocar (posteriormente se indicará cómo meter los rodamientos y embutir tuercas) para que se vean visualmente todos los componentes:



*Ilustración 79 Montaje brazo (arm PSI)*

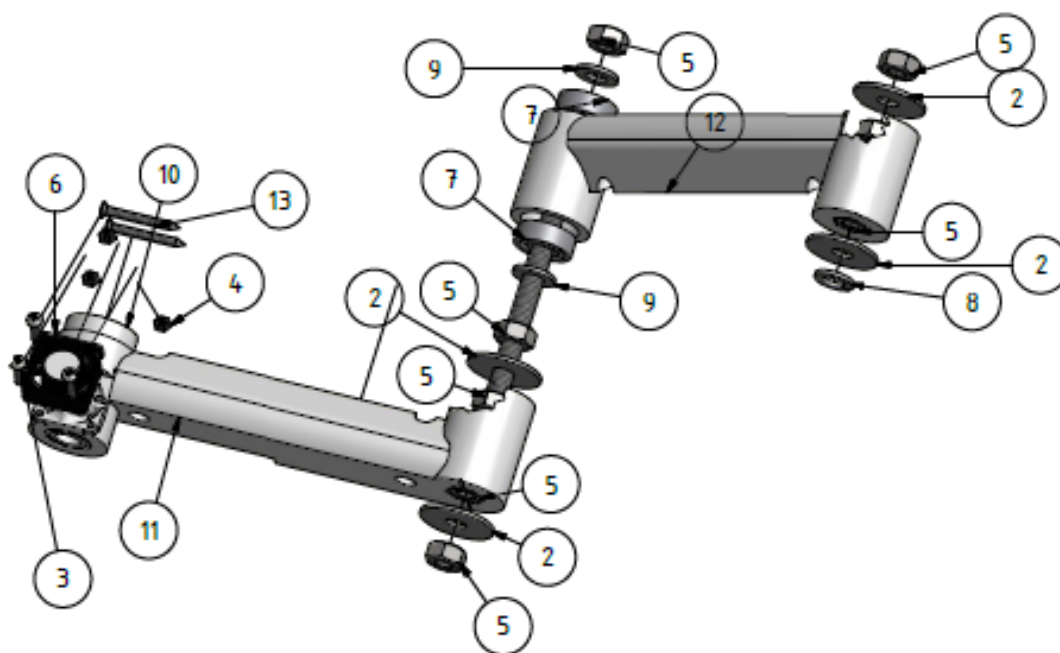


Ilustración 80 Esquema montaje brazo (arm PSI)

Referencia numérica	Cantidad	Nombre
1	1	Varilla roscada M8 100 mm
2	4	Arandela M8
3	3	Tornillo M3 x 12 mm
4	3	Tuerca M3
5	8	Tuerca M8
6	1	Parte ventilador Hotend
7	2	Rodamiento de bolas 608zz
8	1	Arandela M8 tipo Grower
9	2	Arandela M8
10	1	Parte impresa
11	1	Parte impresa
12	1	Parte impresa
13	2	Perno cabeza 2-3 mm, long 30 mm

Tabla 2 Materiales brazo (arm PSI)



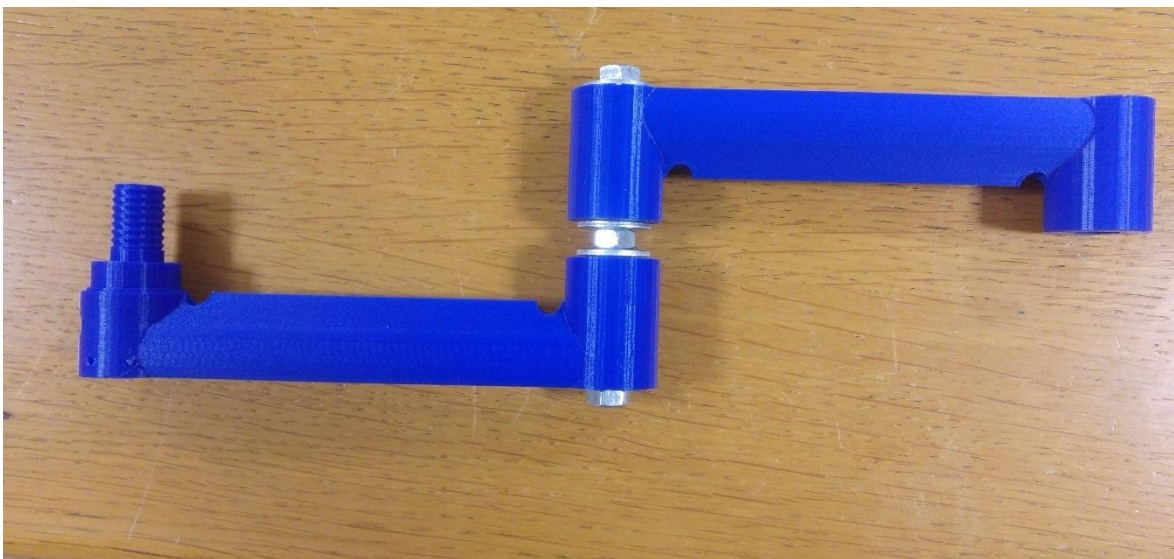
Consejos para meter los rodamientos y embutir las tuercas:

- Para meter los rodamientos se utilizó un martillo de goma y un trozo de madera sobrante de la base la impresora. Se colocaba la madera sobre el rodamiento y, golpeando con el martillo, entraba el rodamiento con bastante apriete.
- En el caso de la embutición de las tuercas, también en algunos casos se producía un apriete muy alto, por lo que era difícil embutir la tuerca. Como solución, se calentó la tuerca con un soldador de estaño, de forma que la tuerca entrara con mayor facilidad.



*Ilustración 81 Ejemplo de rodamientos metidos y tuercas embutidas*

En la siguiente ilustración se ve el brazo con los dos eslabones unidos creando un par de revoluta:



*Ilustración 82 Montaje finalizado brazo (arm PSI)*

A continuación, se procede a realizar el montaje del otro brazo (el arm Theta):

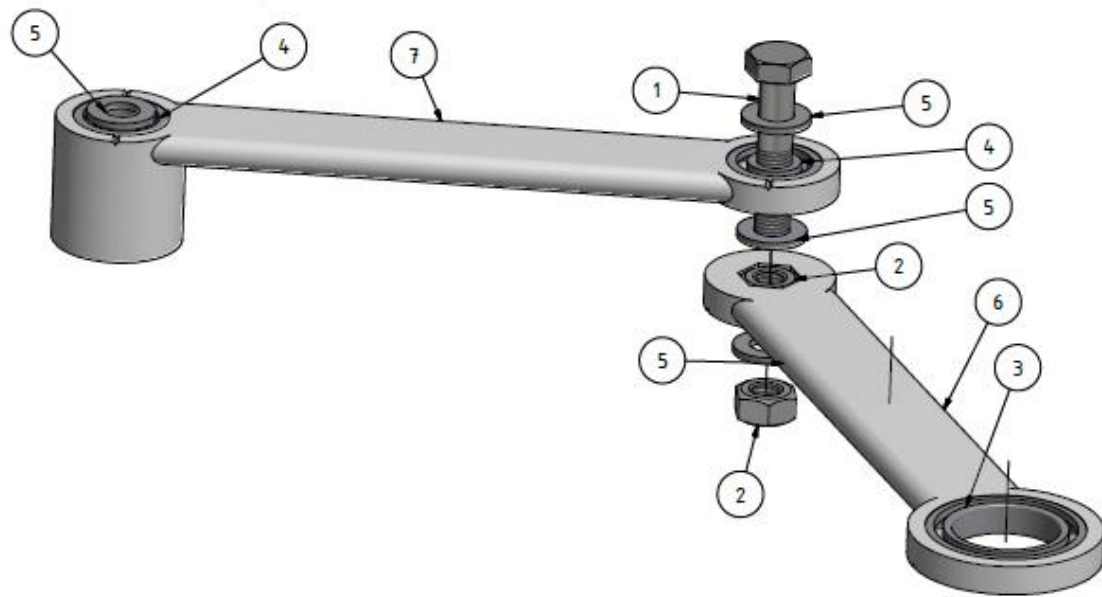
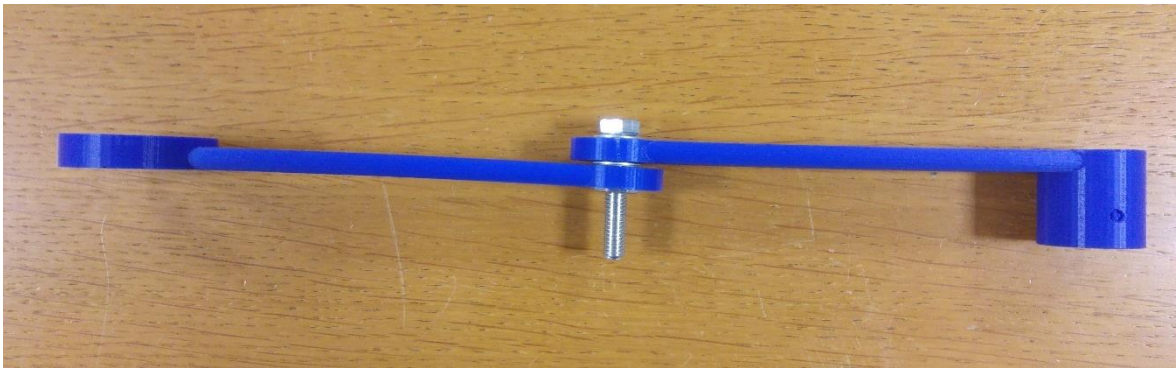


Ilustración 83 Esquema montaje brazo (arm Theta)

Referencia numérica	Cantidad	Nombre
1	1	Tornillo M8 x 40 mm
2	2	Tuerca M8
3	1	Rodamiento de bolas 6805-2RS
4	2	Rodamiento de bolas 608zz
5	4	Arandela M8
6	1	Parte impresa
7	1	Parte impresa

Tabla 3 Materiales brazo (arm Theta)

El resultado final se puede ver en las siguientes ilustraciones:



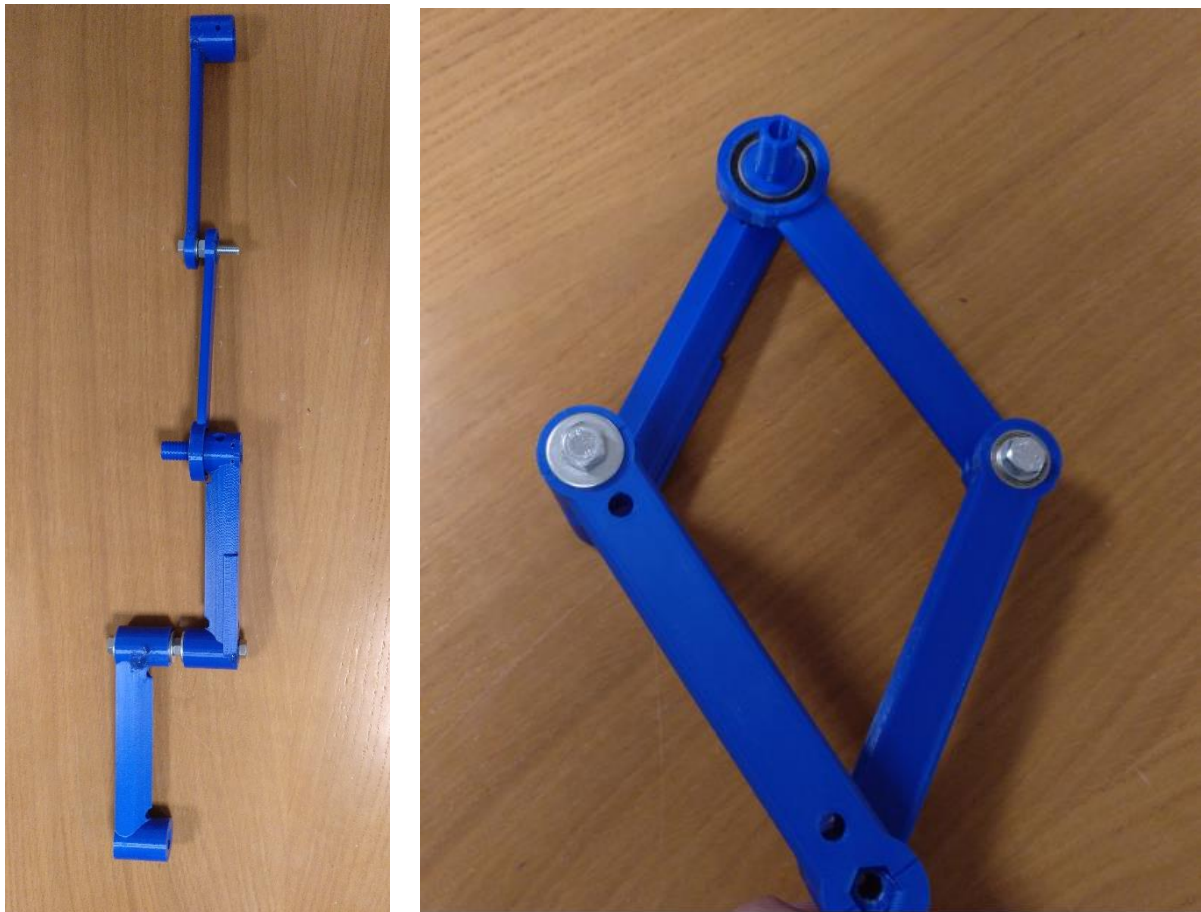
*Ilustración 84 Brazo vista frontal (arm Theta)*



*Ilustración 85 Brazo vista en planta (arm Theta)*



Por último, antes de juntar los brazos al movimiento de las poleas, se deben unir los dos brazos por la parte del extrusor:



*Ilustración 86 Los dos brazos unidos*

#### 4.4.5 Bases superior e inferior de la estructura

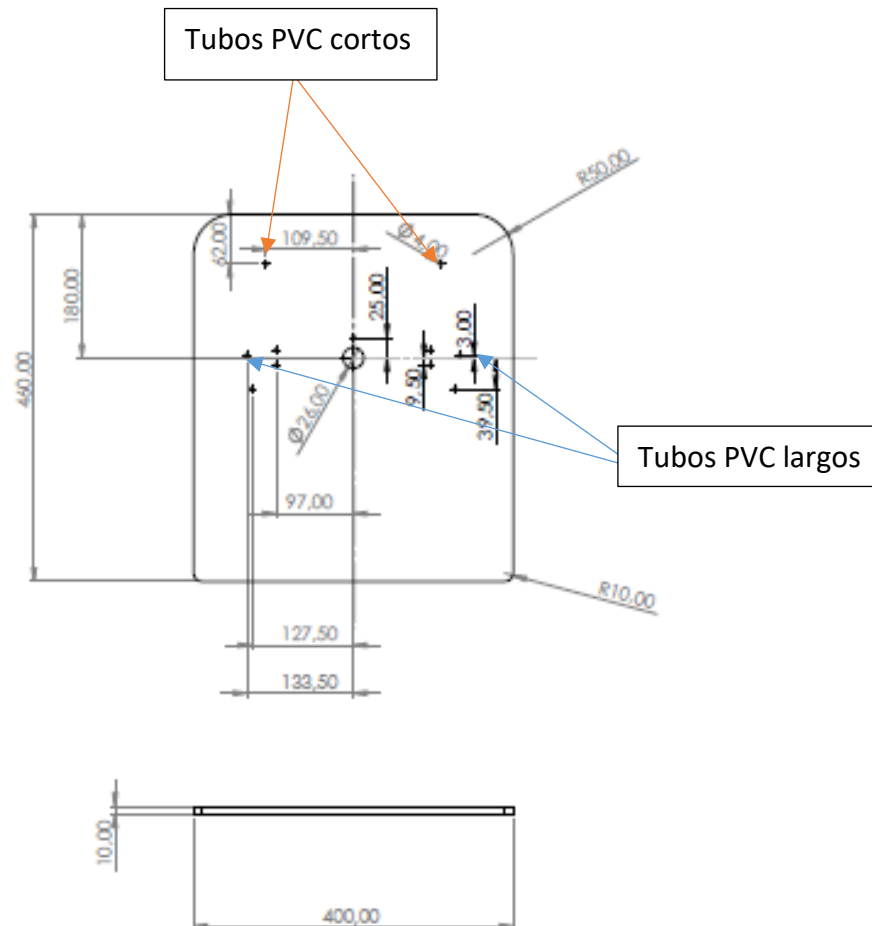
Esta parte ha sido ligeramente modificada respecto al diseño original, se pueden ver los planos en Anexos, con las medidas exactas para cortar y taladrar.

Ambas bases, tanto la superior como la inferior, han sido realizadas con madera MDF, por ser éste un material económico, fácil de trabajar y lo suficientemente resistente como para aguantar la estructura y esfuerzos que pueda haber. No obstante, también se podrían realizar estas bases de metal, metacrilato u otros tipos de madera.

Como observación, decir que los tubos de PVC largos (de 459 mm) van con los soportes impresos “que tienen agujero”, es decir, los que son más inclinados, y se colocan en la parte anterior de la impresora 3D, donde los agujeros que están en la misma altura horizontal donde va el tubo de cobre de diámetro 22 mm.



Por otro lado, los tubos de PVC cortos (de 452 mm) van con los soportes impresos en PLA sin agujero y se colocan en los dos agujeros de la parte posterior de la impresora 3D.

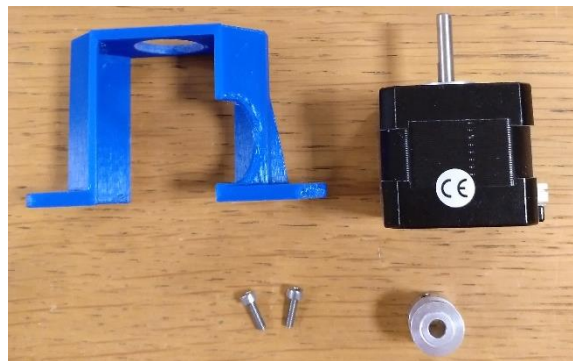


*Ilustración 87 Aclaración base inferior madera MDF*

#### 4.4.6 Soportes de motores

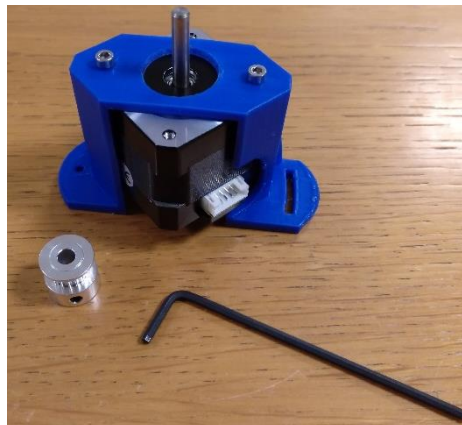
En este apartado se montan los dos motores encargados de mover los brazos en sus respectivos soportes y se les añade en el eje del motor una polea T2.5 16 dientes 5mm (cada motor mueve un brazo distinto). Ambos motores utilizados son motores paso a paso modelo Nema 17 4.4 kg/cm.

Se diferencia un soporte más alto que otro, ya que las poleas de PLA que mueven los brazos están situadas a diferentes alturas cada una. Dejando a un lado la altura, ambos soportes son iguales.



*Ilustración 88 Componentes montaje soporte bajo motor*

El motor es atornillado al soporte de PLA, mediante dos tornillos de M4 mediante una llave Allen:



*Ilustración 89 Motor atornillado a soporte*

Por último, se coloca la polea en el eje del motor:



*Ilustración 90 Montaje finalizado motor paso a paso en soporte bajo*

Se realizaría el mismo procedimiento para el otro soporte, el resultado final debe ser:



*Ilustración 91 Montaje de soportes alto y bajo para motor paso a paso*

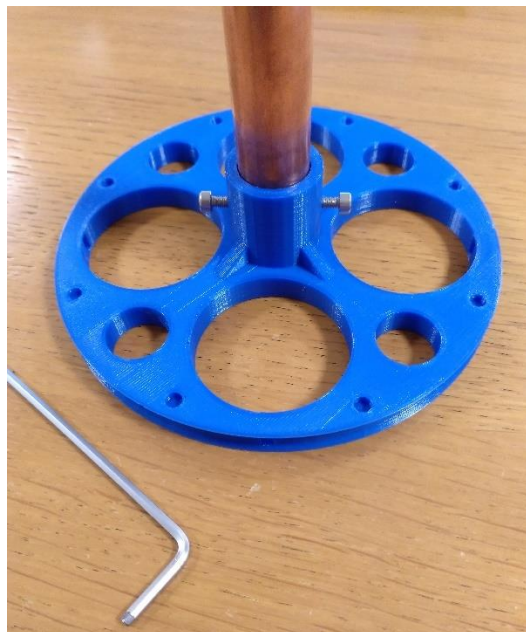
#### 4.4.7 Montaje poleas

En este apartado se describe el montaje de las dos poleas de PLA que son movidas por los motores mediante una correa T2.5.

##### *Montaje polea del motor soporte alto*

Este montaje es muy rápido y fácil. Se introduce el tubo de cobre de 22 mm en la polea. Es importante que polea y tubo queden unidos solidariamente. Lo mejor es que el tubo entre con cierto apriete; además, se pueden colocar dos tornillos prisioneros para evitar el deslizamiento de una pieza sobre otra.

Si el tubo entra en la pieza con mucho juego, puede deberse a que la impresora donde se han impreso las piezas está mal calibrada, por lo que tocará realizar ajustes en la calibración o cambiar el diseño CAD, diseñando un agujero en la pieza con “algo” menos de diámetro.



*Ilustración 92 Montaje polea soporte superior*

### Montaje polea del soporte motor bajo

En primer lugar, se deben de embutir dos tuercas M8, una por cada extremo:



Ilustración 93 Embutición en polea de tuercas M8

La varilla roscada de M8 (650 mm de longitud) se fija a la polea de forma que ambas giren de solidariamente. Esto se consigue apretando hacia la pieza mediante tuercas y arandelas. En este montaje se utilizan dos rodamientos 608zz, uno que sirve de apoyo para este montaje sobre una pieza impresa en la base inferior de la impresora. El otro rodamiento sirve para que la otra polea superior se apoye y rote (se introduce parte del agujero de la polea sobre este rodamiento).



Ilustración 94 Montaje finalizado polea de soporte motor bajo

A continuación, se detalla el montaje:

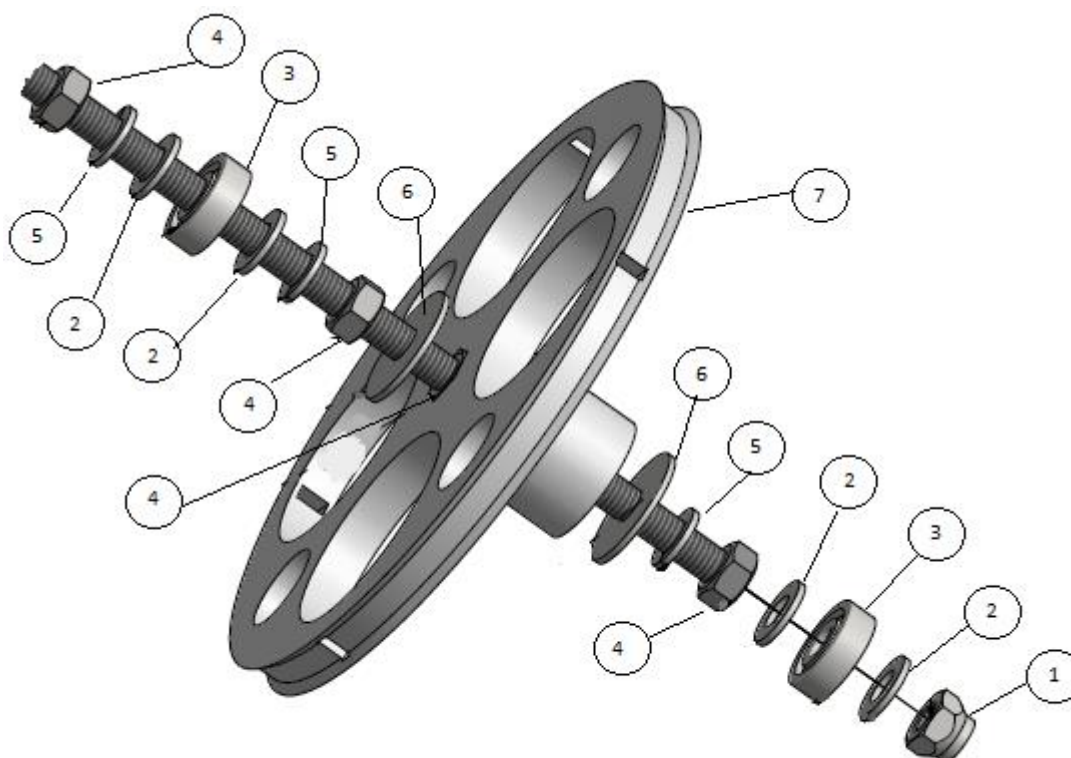
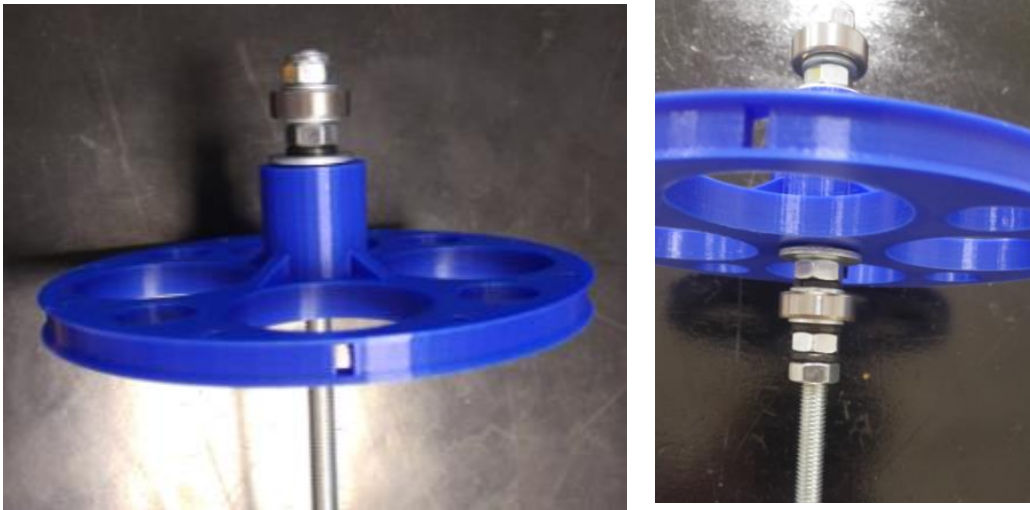


Ilustración 95 Esquema montaje polea soporte motor bajo

Referencia numérica	Cantidad	Nombre
1	1	Tuerca autoblocante M8
2	4	Arandela M8
3	2	Rodamiento 608zz
4	4	Tuerca M8
5	3	Arandela M8 tipo Grower
6	2	Arandela M8 28mm
7	1	Pieza impresa

Tabla 4 Lista materiales montaje polea soporte motor bajo

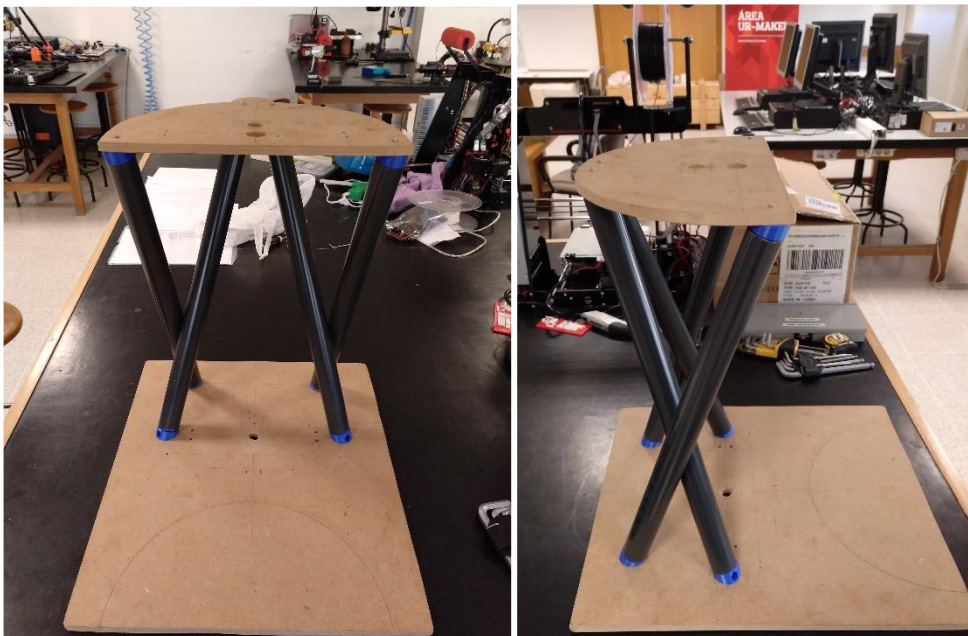




*Ilustración 96 Vistas polea soporte motor bajo*

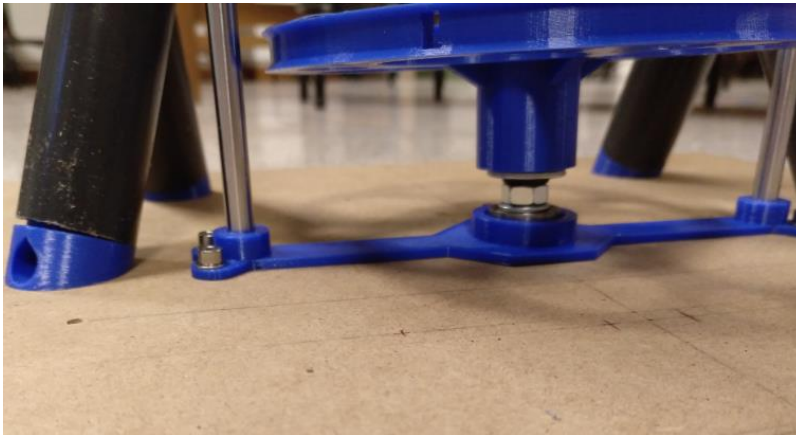
#### 4.4.8 Montaje final estructura

Es necesario comprobar que la estructura (los 4 tubos de PVC) encajan correctamente, formando una estructura rígida y estable con los soportes de PLA fijados mediante tornillos a las bases, superior e inferior, de madera MDF:



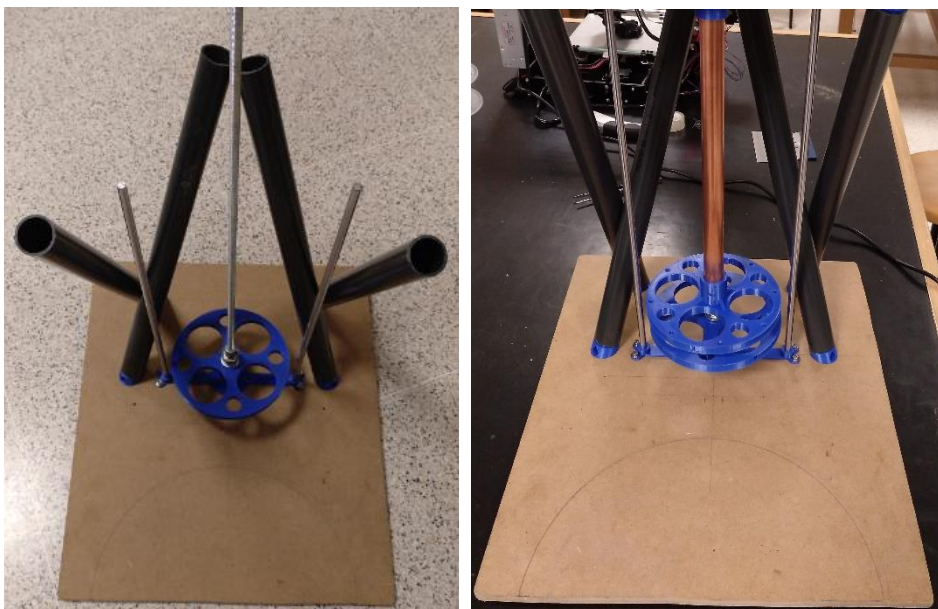
*Ilustración 97 Estructura cuatro apoyos*

Después, se desmonta la base superior para colocar los montajes con las poleas impresas, introduciendo, en primer lugar, el rodamiento que se encuentra en el extremo del montaje de la polea, que irá conectada con el soporte bajo para motor, en la pieza impresa dispuesta en la base de madera:



*Ilustración 98 Introducción del rodamiento del montaje polea motor soporte bajo*

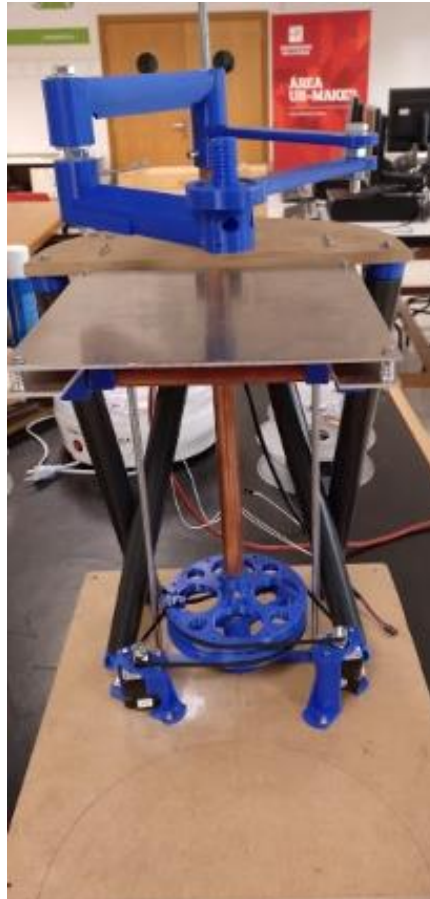
A continuación, se coloca la polea superior, introduciendo el agujero de la polea por la parte de abajo en el rodamiento:



*Ilustración 99 Montaje estructura impresora 3D RepRap Morgan*

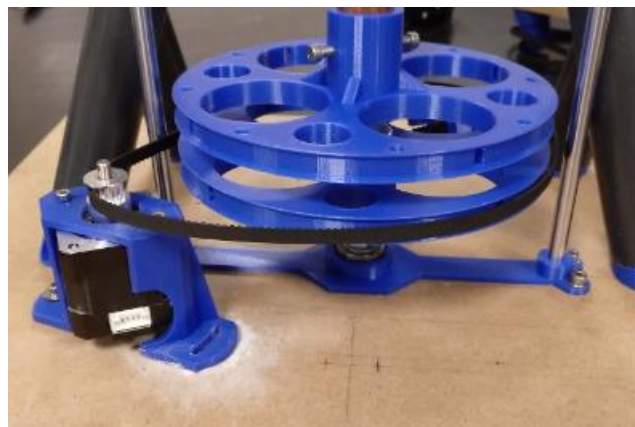
Se pasa la plataforma de impresión por las dos varillas metálicas, después se coloca la base superior de madera. Además, también se colocan los brazos y los motores con las correas conectadas a las poleas:





*Ilustración 100 Montaje final estructura RepRap Morgan*

El siguiente paso es atornillar a la base los soportes de los motores. En los planos de la base (en anexos) está el agujero para taladrar en un lado, mientras que el otro es una corredera para permitir tensar las correas, y en los planos no se especifica este agujero ya que se taladrará una vez se haya comprobado una correcta disposición, que mantenga la correa tensa y no roce con las varillas metálicas.



*Ilustración 101 Ejemplo colocación soporte motor bajo y correa T2.5*

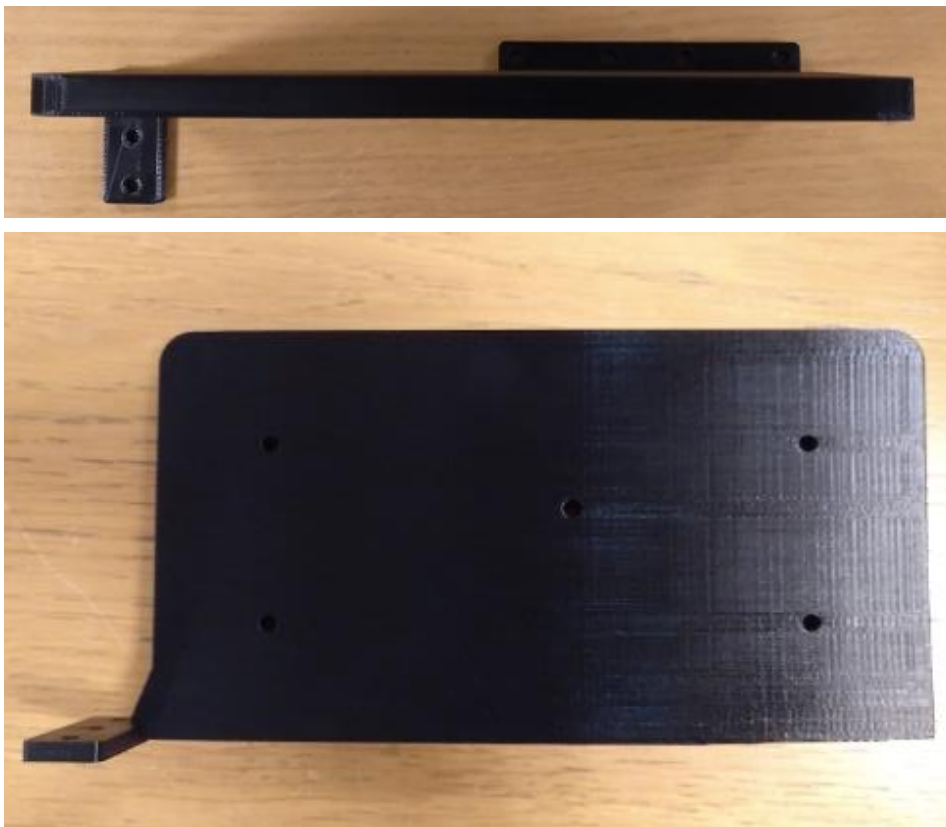
Para el caso de la polea superior el procedimiento es el mismo.

## 4.5 Conexiones y electrónica

En este apartado se describen las principales conexiones de la impresora. Destacan tres tipos de componentes: la fuente de alimentación, la placa Arduino Mega 2560 (con Ramps 1.4 que son los elementos que controlan los motores paso a paso) y, por último, el resto de componentes conectados a la placa Arduino, con elementos tales como motores paso a paso, sensores final de carrera, la cama caliente (Heatbed), etc.

### 4.5.1 Fuente de alimentación

Se atornilla la fuente de alimentación (12V 30<sup>a</sup> – 360W) a la carcasa-soporte impresa (ver en planos Anexos) en PLA. Después, se atornilla la carcasa a la base de madera



*Ilustración 102 Carcasa-soporte para fuente de alimentación*

El resultado final se muestra en la ilustración 103. Se ha elegido fijar la carcasa en ese lugar, ya que es adecuado para las posteriores conexiones de cables y parece un lugar de fácil acceso. No obstante, se puede colocar en cualquier parte, siempre y cuando se tengan en

cuenta las futuras conexiones a realizar y que vaya a haber espacio para la placa Arduino, pantalla LCD, etc.



*Ilustración 103 Fuente de alimentación fijada en la carcasa-soporte*

#### 4.5.2 Interruptor (con toma de corriente)

En modelos de impresoras cartesianas es común ver el interruptor y la fuente de alimentación junta en una misma carcasa. Sin embargo, debido a los apoyos/extremidades inclinadas de este modelo, las cuales no facilitan la utilización de esta estructura como elemento para fijar carcasas u otros elementos, se ha realizado una carcasa a parte para el interruptor (ver en planos Anexos).



Ilustración 104 Interruptor con toma de corriente y cable

Se debe seguir el siguiente esquema para realizar las conexiones:

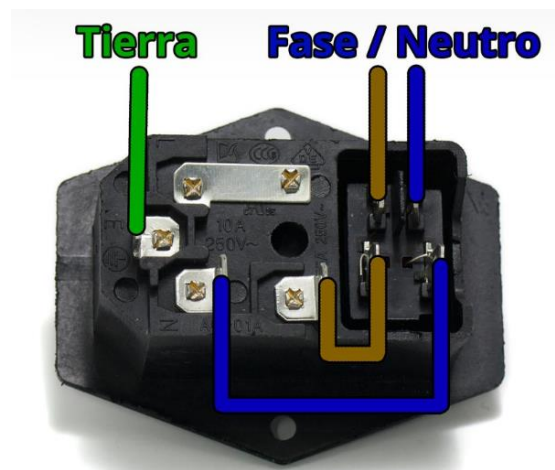


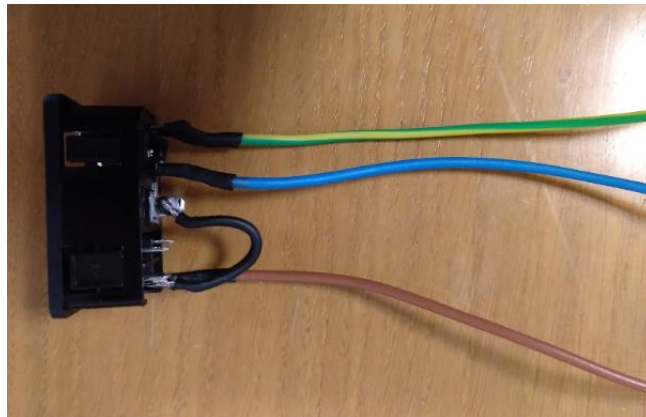
Ilustración 105 Interruptor cableado (Fuente: HTA3D. Recuperado de: <https://www.hta3d.com/es/toma-de-corriente-con-interruptor-para-fuente-de-alimentacion>)

Para soldar los cables se necesita un soldador, estaño y unas pinzas para manipular los cables:



Ilustración 106 Materiales para soldar los cables

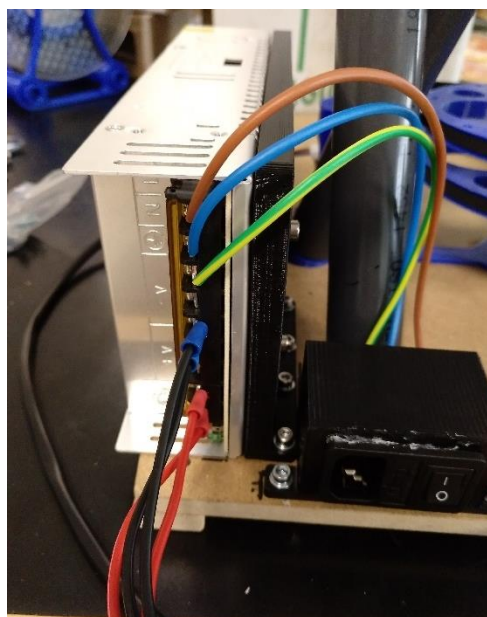
El resultado esperado es:



*Ilustración 107 Cables soldados en interruptor*

Se han colocado unos tubos termorretráctiles en los extremos soldados por ser aislantes eléctricos. Estos tubos se contraen al aplicar una fuente de calor (por ejemplo, un encendedor).

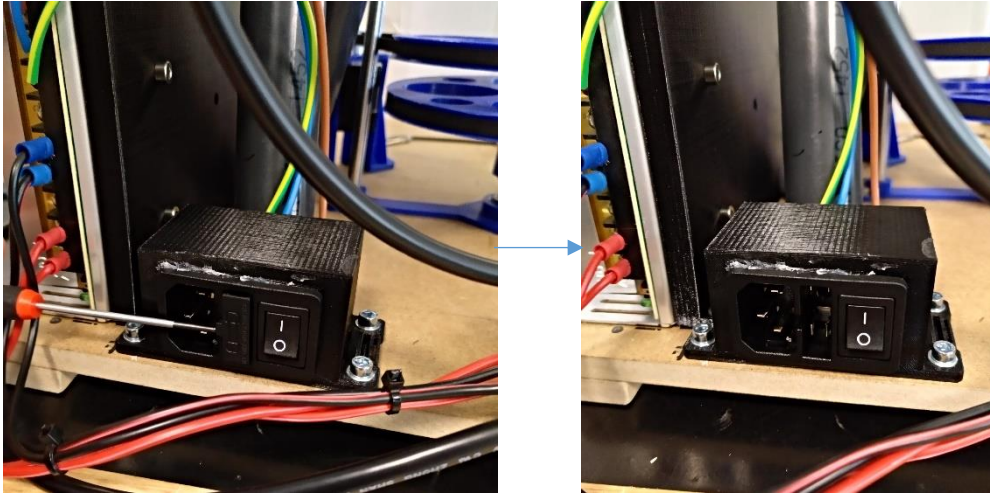
Una vez los cables han sido soldados, se mete el interruptor en su carcasa y ésta se atornilla a la base de madera. El siguiente paso es conectar los cables a la fuente de alimentación.



*Ilustración 108 Interruptor conectado a fuente de alimentación*



Por último, es necesario colocar un fusible como medida de seguridad. Para ello, se levanta una tapa con ayuda de un destornillador plano, tal y como se ve en la ilustración 109, y se coloca el fusible.



*Ilustración 109 Introducción de fusible en interruptor*



*Ilustración 110 Fusible de 6ª para protección ante cortocircuitos*

### 4.5.3 Relé cama caliente

La cama caliente está preparada para funcionar de la red eléctrica directamente.

Para controlar la cama caliente mediante la placa Arduino, hay que utilizar un relé, el cual actuará como un interruptor para cerrar el circuito eléctrico, permitiendo que se caliente la resistencia de la cama caliente, o se abra el circuito, según indique el termistor la temperatura que se haya fijado en el Firmware.

El relé está formado por una bobina, la cual, al recibir corriente eléctrica, actuará como un electroimán, haciendo que las dos placas metálicas se junten, permitiendo el paso de corriente eléctrica. Además, se ha comprado con el zócalo (pieza azul) para facilitar su montaje y fijación a la base.



Ilustración 111 Relé de la cama caliente

Para el montaje del relé se ha utilizado un carril para fijarlo a la base de madera:

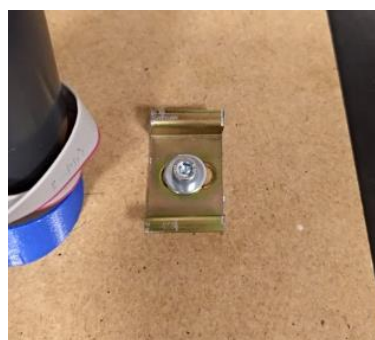


Ilustración 112 Guía fijación relé

Las conexiones del relé (para una cama caliente de 220V) se han realizado según el siguiente esquema:

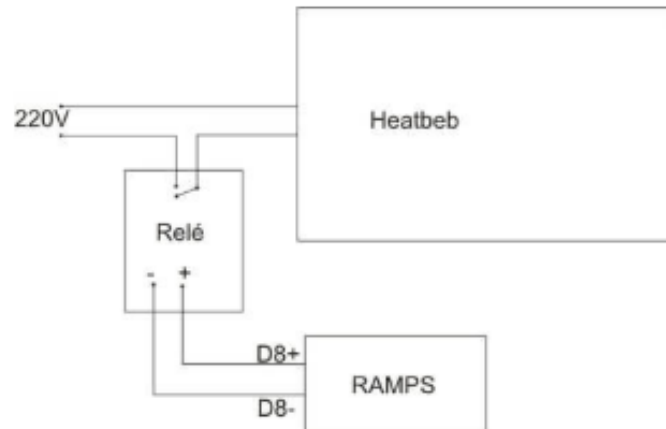


Ilustración 113 Esquema conexiones Relé-Cama caliente (Fuente: Impresoras3Dlowcost Recuperado de: <https://bit.ly/2Lsq0dI>)



Ilustración 114 Conexión D8+ D8- en la placa Arduino



Ilustración 115 Conexiones en el relé



#### 4.5.4 Termistores

Como sensor de temperatura, se va a utilizar el termistor. En concreto, se requerirán dos termistores: uno para medir la temperatura de la cama caliente y otro para la temperatura en el Hotend.

Se requiere crimpar los cables para poder realizar las conexiones en la placa Arduino correctamente y con facilidad. Para realizar este proceso se necesita: crimpadora, terminales de pinza y conectores Dupont.



*Ilustración 116 Crimpadora*



*Ilustración 117 Terminales de pinza*



*Ilustración 118 Conectores Dupont*

Para crimpar basta con colocar el terminal de pinza en un extremo del cable, y apretar mediante la crimpadora, de forma que se doblan las pletinas y queda enganchado al cable, tal y como se muestra en la siguiente ilustración:



*Ilustración 119 Proceso de crimpado*

Por último, faltaría insertar el terminal de pinza en el conector Dupont, hasta que se oiga un “clip”. Gracias a este tipo de conexión, se podrá conectar el termistor al circuito de la placa Arduino.

La colocación del termistor en la cama caliente, mediante cinta Kapton, ya ha sido explicada en el apartado “4.4.1 Montaje plataforma de impresión”.

La colocación del termistor del Hotend ya se realizó durante el montaje del mismo (ver apartado “4.4.3 Montaje Hotend E3D V6”).

En el siguiente apartado “4.5.5 Placa Arduino” se explicarán las conexiones, y lugares de éstas, en la placa Arduino.

#### 4.5.5 Placa Arduino

El modelo de placa Arduino utilizada es “MEGA 2560”.

La placa MEGA 2560 se ha introducido en una carcasa impresa en 3D, que permite atornillar la placa a la base de madera.



*Ilustración 120 Placa Arduino MEGA 2560 montada en carcasa impresa en 3D*

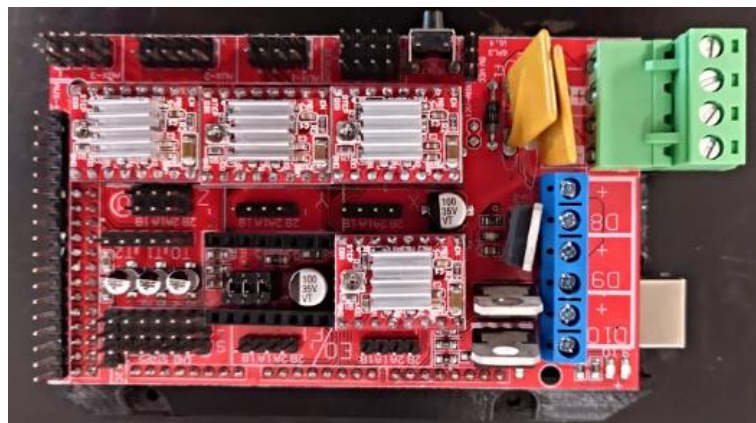
Sobre esta placa, se colocan las RAMPS 1.4.

RAMPS es la sigla en inglés de “RepRap Arduino Mega Pololu Shield”, que es una extensión de la placa que se coloca sobre ésta, habilitando y haciendo posibles conexiones para los Drivers, extrusor, etc.

Los Drivers utilizados son los A4988. Los Drivers son controladores utilizados para el manejo de los motores paso a paso, a través de la placa Arduino MEGA 2560.



*Ilustración 121 Drivers A4988*



*Ilustración 122 RAMPS 1.4, con Drivers A4988, montada sobre placa Arduino MEGA*

Las conexiones de la RAMPS 1.4 se explican a través de la siguiente ilustración:

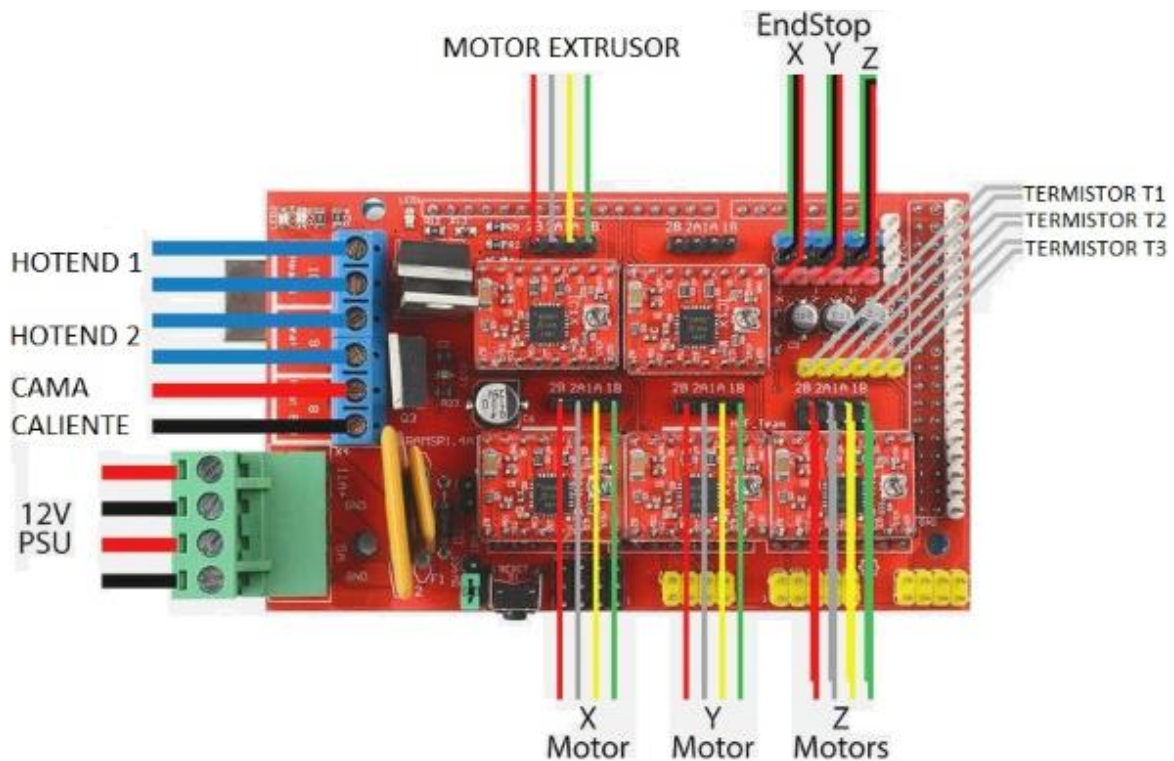


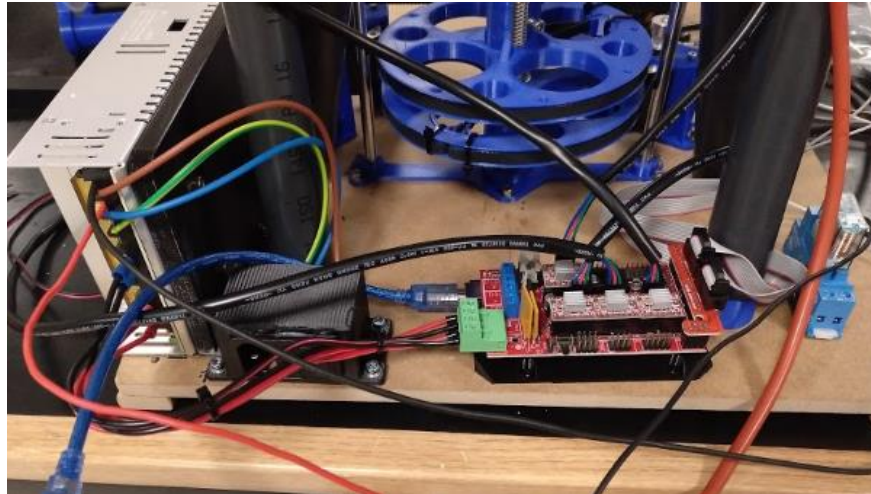
Ilustración 123 Conexiones RAMPS 1.4 en placa Arduino MEGA 2560 (Fuente: Infinitrónica. Recuperado de: <https://bit.ly/2YuRPyA>)

Hay que aclarar que el “TERMISTOR T1” es el del termistor del Hotend, mientras que el “TERMISTOR T2” es el de la cama caliente. La conexión del “TERMISTOR T3” no se utiliza para esta impresora.

Al ser una impresora con sólo un extrusor, se utilizan las conexiones del “HOTEND 1”, quedando sin utilizar las conexiones del “HOTEND 2”.

Las conexiones de “motor X” y “motor Y” se utilizan para mover los dos brazos de la configuración SCARA paralela. Hay dos conexiones para “motors Z”, aunque en este modelo de impresora sólo hace falta una conexión del “motors Z”, la cual se utiliza para el motor que mueve verticalmente la plataforma de impresión, en el eje Z.

Debido al numeroso número de cables, es importante la disposición de la placa Arduino. En este caso se ha dispuesto cerca de la fuente de alimentación y del relé de la cama caliente.

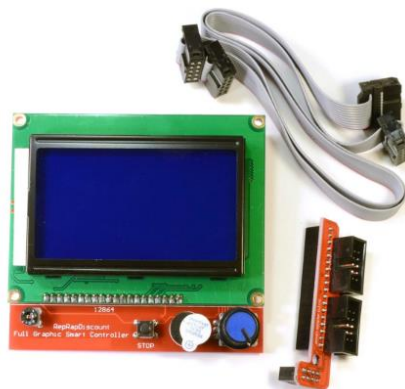


*Ilustración 124 Disposición placa Arduino MEGA 2560*

#### 4.5.6 Pantalla LCD

Inicialmente se realizaron las conexiones para una pantalla LCD “Full Graphics” modelo 12864, para la cual se imprimió una carcasa de PLA. No obstante, hay que avisar de que, de cara a la configuración del Firmware en el Marlin, es más sencillo utilizar una pantalla LCD Smart Controller (que no sea “Full Graphics”), ya que no se requieren de librerías adicionales y se pueden evitar, de esta forma, posibles errores de compilación.

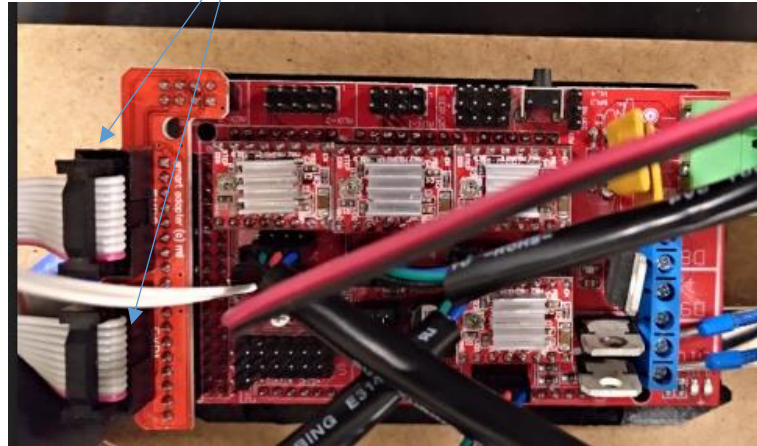
La conexión de la pantalla LCD se explica mediante las siguientes ilustraciones:



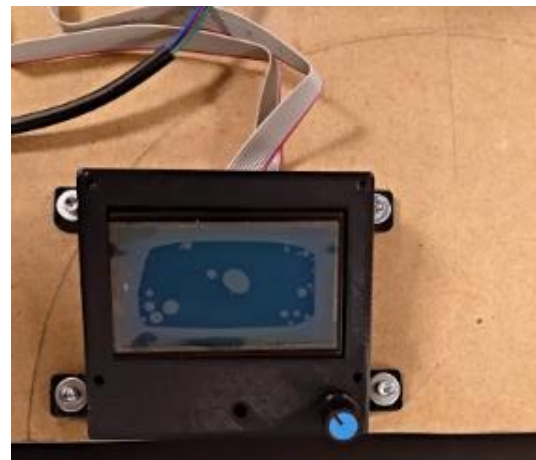
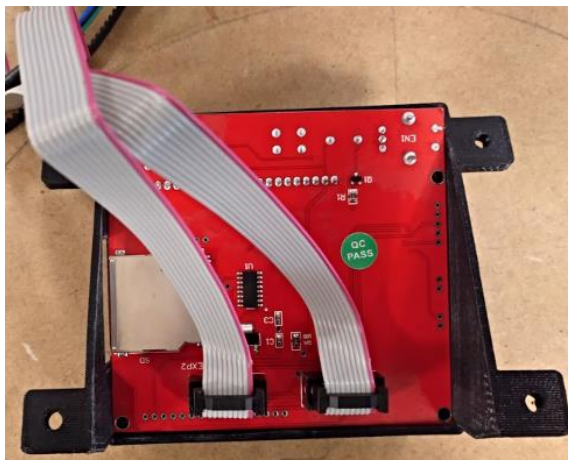
*Ilustración 125 Componentes de la pantalla LCD Full Graphics*



Conexiones de la pantalla  
LCD en la RAMPS 1.4



*Ilustración 126 Conexiones pantalla LCD en las RAMPS 1.4*

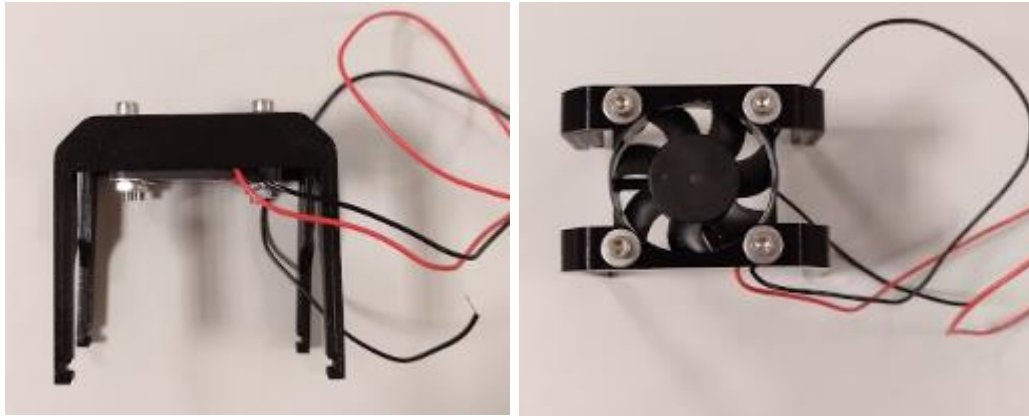


*Ilustración 127 Pantalla LCD Full Graphics*

#### 4.5.7 Ventilador placa Arduino

Para evitar sobrecalentamiento por el funcionamiento de la electrónica, se coloca un ventilador sobre la RAMPS 1.4. Se ha impreso en 3D un soporte para este ventilador. Es importante colocar el ventilador de forma que el flujo de aire salga hacia la placa Arduino.

El ventilador utilizado es de 12V, con dimensiones 40x40x10 mm.



*Ilustración 128 Ventilador de la placa Arduino MEGA 2560*

#### 4.5.8 Finales de carrera (Endstops)

Los finales de carrera, que también suelen ser llamados por su nombre en inglés como Endstops o End-stops, se utilizan para dos funciones principalmente. Por un lado, sirven para establecer el sistema de referencia (home position) de la impresora, para que el programa sepa en qué posición está el extrusor. La otra función de los finales de carrera, aún más importante si cabe, es de seguridad, ya que evita que la impresora se salga fuera de su rango de movimiento, evitando problemas que derivarían en averías o daños de la impresora.

El tipo de final de carrera propuesto por el creador original de la impresora RepRap Morgan, Quentin Harley, es el sensor de efecto Hall (en inglés, Hall effect sensor). En este trabajo se explica el montaje y conexión de este tipo de final de carrera (sensor Hall) pero también se propone y explica el montaje y conexión de un final de carrera mecánico, como posible alternativa. Se necesitan, en total, tres finales de carrera: uno para la plataforma en el eje Z y dos más, uno para cada una de las poleas que mueven los brazos.

#### *Sensor de efecto Hall*

El modelo de sensor de efecto Hall utilizado es el A3144.

El sensor se acciona mediante la presencia de un campo magnético, siendo pequeño imán situado a varios centímetros suficiente, aunque la distancia de alcance dependerá de la intensidad del campo magnético. Este sensor está formado por tres patillas, una de ellas se conecta a una fuente de alimentación continua de 5V, la central se conecta a tierra y, por último, una tercera patilla que sirve para mostrar una salida digital.

El modelo de sensor A3144 se puede ver a continuación:

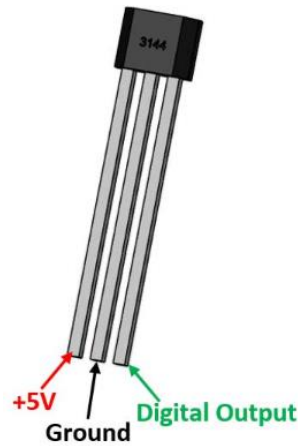


Ilustración 129 Sensor de efecto Hall modelo A3144. (Fuente: Uchi. Recuperado de: <https://bit.ly/2RHzhJ8>)

Para realizar las conexiones del sensor de efecto Hall hacen falta una resistencia eléctrica R1 (10K) y un condensador C1 (0.1uF), los cuales se conectan según el siguiente esquema:

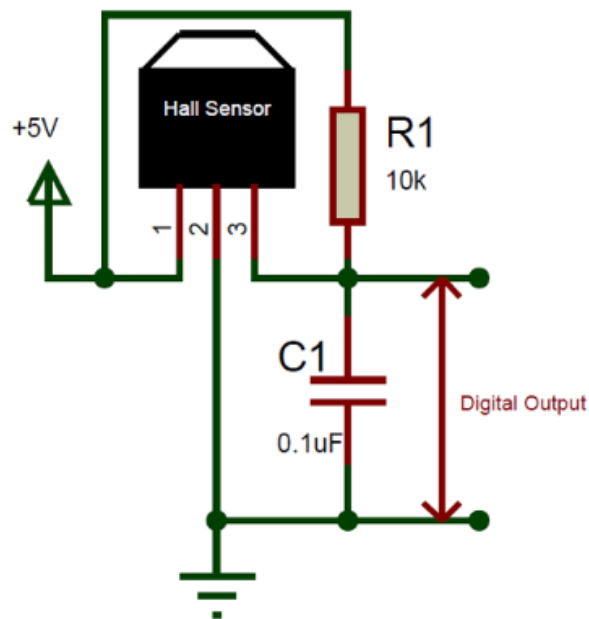
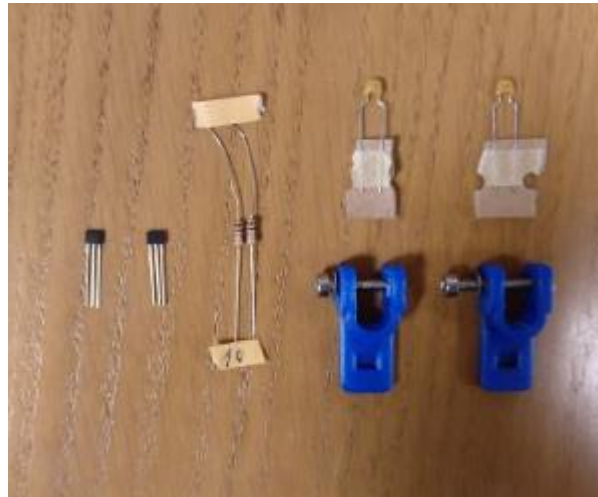


Ilustración 130 Esquema conexiones sensor de efecto Hall

Estas conexiones del esquema se realizan en una placa PCB de circuito impreso.

Para realizar estas conexiones es preciso soldar los cables. A continuación, se muestran ilustraciones del proceso seguido.





*Ilustración 131 Componentes de circuito sensor de efecto Hall*

Se sueldan los cables (mediante soldador de estaño) a las patillas del sensor de efecto Hall, estando éste apoyado sobre el soporte impreso en 3D:



*Ilustración 132 Patillas sensor Hall soldadas a cables*

Es importante que, tan pronto como se termine de realizar las soldaduras, se coloque sobre cada una de éstas un termorretráctil que actúe como medida de seguridad ante cortocircuitos.

Se realizan sobre el circuito impreso las conexiones del esquema de la ilustración 133:



*Ilustración 133 Conexiones en placa PCB circuito impreso*

Por último, se colocan los soportes con los sensores de efecto Hall en una de las dos varillas metálicas lisas, uno de los sensores para la polea superior y otro para la polea inferior (el soporte se coloca por debajo de esta polea, con la cabeza del sensor hacia arriba). Hace falta colocar dos pequeños imanes, uno por cada polea, pero se recomienda no colocarlos hasta que se sepa el lugar de referencia del extrusor, es decir, el “home position”.

#### *Final de carrera mecánico*

Otra opción alternativa, en caso de no tener disponibilidad de los sensores de efecto Hall, es realizar el montaje y conexiones mediante finales de carrera mecánicos.

Se han elegido finales de carreras mecánicos con la placa incorporada. En primer lugar, se atornilla la placa al soporte de PLA:



*Ilustración 134 Final de carrera mecánico atornillado en soporte*



*Ilustración 135 Final de carrera mecánico atornillado en soporte, vista de perfil*

Se ha impreso una pequeña pieza, la cual se colocará mediante un material aglutinante, en las poleas, una vez son conocidas mediante prueba y error las “home position”, de cada una de las poleas. La pieza impresa hará de tope para accionar el interruptor mecánico del final de carrera y se puede ver en la siguiente ilustración:



*Ilustración 136 Tope impreso final de carrera mecánico*

Se colocan los soportes con los finales de carrera en una de las varillas lisas de métrica 8, colocando el final de carrera de la polea superior encima de ésta, y el final de carrera de la polea inferior se coloca debajo de ésta.

Es importante colocar el interruptor del final de carrera en la orientación correcta para que pueda chocar y ser accionado por el tope impreso.

En la siguiente ilustración, se puede ver un ejemplo de la colocación del soporte final de carrera para la polea superior:



*Ilustración 137 Colocación soporte del final de carrera mecánico*

## 4.6 Firmware

El firmware utilizado es Marlin, que es de código abierto y está basado en la plataforma Arduino. Es especialmente usado en las impresoras 3D RepRap, de modelado por deposición fundida (MDF). Marlin tiene licencia GPL (del inglés, General Public License), por lo que cualquier entidad o persona que modifique o expanda el código, debe compartirlo.

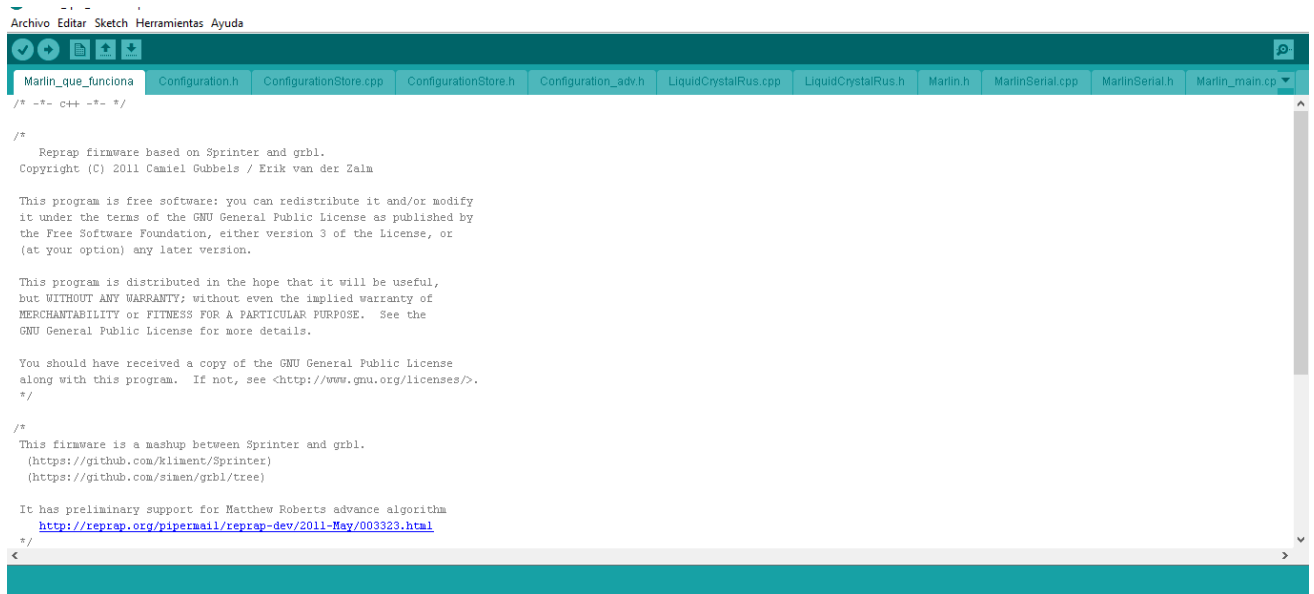
El lenguaje G-Code (código para controlar máquinas), que ha sido generado mediante el programa Cura, es enviado al Marlin.

Para poder cargar y modificar el Marlin, se utiliza la aplicación “Arduino IDE”, la cual se puede descargar e instalar desde la propia página de Arduino, a la que se puede acceder desde la siguiente dirección URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> .

En el caso de las impresoras 3D, cada modelo suele tener su código Marlin “base”, que tiene configurado el tipo de movimiento y funcionalidades particulares. Sobre este código se suele trabajar realizando cambios y configuración de diferentes parámetros, para calibrar y configurar la impresora, según los componentes electrónicos que se tengan (motores, tipo de termistores, tipo de pantalla LCD, etc.), así como otras características relacionadas con el tipo de uso y finalidad de la impresora, pudiendo obtener diferentes calidades de impresión según se configuren parámetros como velocidad de movimiento de impresión, velocidad de extrusión, etc.

El código “base”, del modelo de impresora RepRap Morgan, al que luego se realizarán modificaciones, se puede encontrar en la siguiente dirección URL: <https://github.com/gharley/Marlin/tree/armlevel> .

Una vez que se abre Arduino IDE, hay que abrir, del Marlin que se haya descargado previamente, el fichero “.ino”, con lo que se abren todas las líneas de código:



```

Archivo Editor Sketch Herramientas Ayuda
Marlin_que_funciona Configuration.h ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp LiquidCrystalRus.h Marlin.h MarlinSerial.cpp MarlinSerial.h Marlin_main.cp
/* -*- c++ -*- */

/*
 * Reprap firmware based on Sprinter and grbl.
 * Copyright (C) 2011 Camiel Gubbels / Erik van der Zalm
 *
 * This program is free software: you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
 * (at your option) any later version.
 *
 * This program is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
 */

/*
 * This firmware is a mashup between Sprinter and grbl.
 * (https://github.com/kiliment/Sprinter)
 * (https://github.com/simen/grbl/tree)
 *
 * It has preliminary support for Matthew Roberts advance algorithm
 * http://reprap.org/pipermail/reprap-dev/2011-May/003323.html
 */

```

Ilustración 138 Arduino IDE con el código Marlin

Una vez abierto el código, lo primero es seleccionar el tipo de placa que se esté usando. Casi todos los cambios que se realizan, son en el fichero llamado “configuration.h”, pudiéndose luego modificar más ficheros si se diera el caso de que fuera necesario, por ejemplo, el fichero “configuration\_adv.h”

Por defecto, aparecen todas las placas más usadas, comentadas al principio de cada línea con doble barra “//”. El hecho de que una línea esté comentada, significa que el programa no compilará esa línea de código, por lo que las líneas comentadas (“//”), se utilizan para realizar aclaraciones o para comentar tener opciones deseleccionadas, que cada usuario tendrá que seleccionar (borrando las dos barras inclinadas //), según los componentes de hardware que se tengan.

En el caso particular se ha elegido la línea 33 de Ramps 1.3 (en realidad sería la Ramps 1.4 pero al ser una versión antigua no aparece).

Línea comentada:

// 33 = RAMPS 1.3 (Power outputs: Extruder, Bed, Fan)

Línea seleccionada:

33 = RAMPS 1.3 (Power outputs: Extruder, Bed, Fan)

En función de los componentes que se tengan y de las necesidades en cuanto velocidad y precisión, habrá que cambiar más o menos líneas y parámetros del código.

Se recomienda la lectura del extenso y detallado artículo “Guía detallada para configurar Marlin” de Javier Loureiro, fundador de Staticboards, quien repasa todos los principales posibles parámetros que se necesitan cambiar en una impresora 3D, el cual se puede encontrar en: <https://www.staticboards.es/blog/marlin-instalacion-configuracion/>

Algunos de los aspectos y parámetros más importantes que hay que definir correctamente son:

- En Thermal settings, donde hay que definir cada número de termistor que controla la temperatura de la cama caliente y, otro, del Hotend. En el caso particular de este trabajo era el termistor nº1 para la cama caliente y el nº5 para el Hotend.
- En Movement settings, donde se define la cinemática. Hay que tener especial atención con el parámetro steps/unit.
- Definir SDSUPPORT
- Encoder settings, hacen que la impresora se mueva más fluida
- La pantalla LCD controller. Ya se avisó que la pantalla Full Graphic puede dar problema según la versión de Firmware que se utilice, ya que hay que descargarse e implementar la librería u8glib, por lo que puede ser más fácil utilizar una pantalla no Full Graphic.

Cuando se realiza un cambio en el código, es interesante darle a compilar, para ver si se ha cometido algún error de lenguaje.

Una vez todos los cambios realizados en el Marlin, conectamos, mediante el puerto USB del portátil, el Marlin con la placa Arduino, dándole al botón que está al lado de compilar, el de subir y, prestando atención en herramientas que está conectado con el puerto serial correcto para transmitir la información.

Después faltará hacer un calibrado, para colocar finalmente los finales de carrera, la posición de Home (de referencia), etc. Se deja aquí en el texto una referencia a los pasos que hay que hacer para la calibración de la impresora RepRap Morgan, según su diseñador: <http://www.morgan3dp.com/morgan-calibration-guide/>

## 4.7 Presupuesto

El precio total del proyecto es de cuatrocientos veinte euros con cincuenta y seis céntimos.

RESUMEN PRESUPUESTO	
Piezas impresas	37,9
Tornillería y otros	15
Componentes y electrónica	367,66
<b>TOTAL</b>	<b>420,56</b>

*Tabla 5 Resumen presupuesto*

Para ver el presupuesto en mayor detalle, ver en Anexos.

## 4.8 Planos

Para ver los planos ir a Anexos. Sólo se han añadido aquellas piezas diseñadas personalmente, o las piezas que han sufrido rediseños, ya que el resto puede imprimirse descargando el fichero “.stl” desde el perfil de Github de Quentin Harley, quien es el diseñador de las piezas originales: <https://github.com/qharley/Morgan/tree/master/stl>

Los planos se han anexado, en orden de importancia<sup>3</sup>, en el siguiente orden:

- Base inferior
- Base superior
- Placa de aluminio inferior
- Placa de aluminio superior
- Carcasa fuente de alimentación
- Carcasa interruptor
- Soporte motor bajo
- Soporte motor alto

---

<sup>3</sup> Con importancia, nótese que hace referencia a la necesidad de visualizar los planos por parte del lector, no de orden de importancia en cuanto a la funcionalidad dentro del funcionamiento de la impresora. Esto es debido a que, en las piezas impresas, salvo para realizar modificaciones o rediseñar, no hace falta visualizar las medidas, mientras que en piezas como las bases superior e inferior son necesarias de cara a realizar cortes y taladrar, durante la fabricación.



## 5 Estudios realizados sobre la impresora 3D RepRap Morgan

### 5.1 Estudio cinemático

#### 5.1.1 Introducción

En el estudio de la cinemática, normalmente, se suele prestar atención al cálculo de las velocidades angulares y lineales. Sin embargo, en la cinemática de los robots, de cara a la programación de éstos, se hace necesario prestar atención a la cinemática de posición, es decir, el cálculo de las diferentes coordenadas articuladas del robot, en el espacio.

Dentro de esta cinemática de los robots, se distinguen dos tipos:

- Cinemática directa

Se busca la posición, de cualquier punto, respecto a un sistema de referencia (normalmente la base), siendo conocidas las longitudes de cada eslabón de la configuración, así como el ángulo de giro de cada uno de ellos. Por lo tanto, conocidas las longitudes, dependiendo de cuántos ángulos se mueve cada articulación se sabrá la posición del actuador final o herramienta.

Métodos:

- Método geométrico
- Mediante los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H)

- Cinemática inversa

En muchas ocasiones se conoce (o sólo interesa) la posición final que debe tener el actuador final o herramienta. En estos casos se utiliza la cinemática inversa, donde, sabiendo la posición final del actuador (y longitudes de los eslabones) se determinan los ángulos que debe tener cada articulación.

Métodos:

- Método geométrico (para robots de pocos grados de libertad)
- Mediante softwares como OpenRave
- Métodos iterativos
- Desacoplamiento cinemático

### 5.1.2 Cinemática Directa mediante Software RoboAnalyzer

En la cinemática directa las posiciones de las articulaciones son conocidas y se quiere conocer la posición del actuador final.

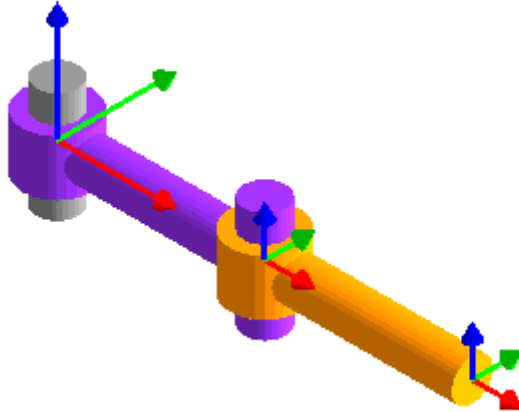
Mediante el software de simulación RoboAnalyzer (aplicación gratuita descargable como software libre en: <http://www.roboanalyzer.com/downloads.html>) se ha simulado el movimiento de un brazo tipo SCARA. Se ha elegido el modelo SCARA (en vez de un modelo SCARA paralelo) por simplicidad y porque no afecta al análisis, ya que, al ser una configuración paralela, el segundo eslabón de uno de los brazos siempre va a tener la misma orientación (ángulo) que el primer eslabón del otro brazo. Por lo tanto, analizando uno de los brazos, se puede determinar la posición final del actuador del mismo modo que analizando los dos brazos.

Para trabajar con esta herramienta, en primer lugar, se deben seleccionar los parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) seleccionando el número de grados de libertad (DOF), que es dos grados de libertad en este caso, los tipos de articulación (revolución en el presente caso) y la longitud de cada eslabón (150 mm para ambos casos). Para resolver la cinemática directa, como parámetros de entrada se ha determinado que la articulación 1 pasa de 0° a 180° y que la articulación 2 pasa de 0° a 90°.

D-H Parameters								
Robot	Joint No	Joint Type	Joint Offset (b) mm	Joint Angle (theta) deg	Link Length (a) mm	Twist Angle (alpha) deg	Initial Value (JV) deg or mm	Final Value (JV) deg or mm
1 DOF								
-select- v	1	Revolute	0	Variable	150	0	0	180
2 DOF								
2R v	2	Revolute	0	Variable	150	0	0	90
3 DOF								
-select- v								

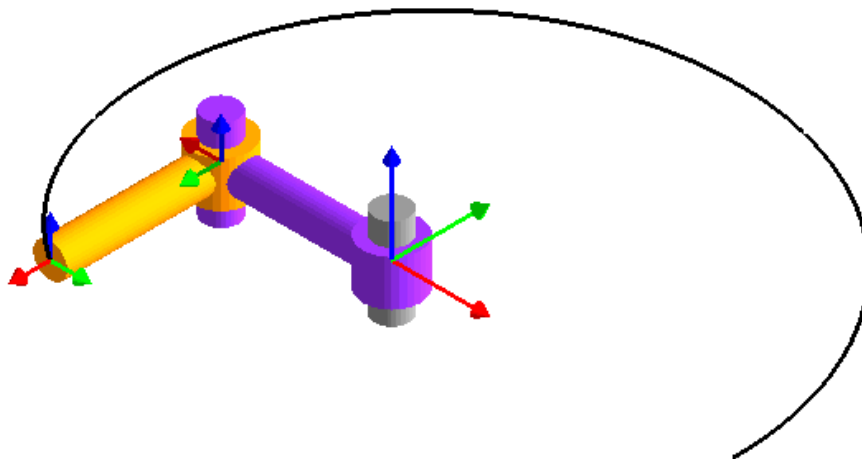
Ilustración 139 Determinación parámetros de Denavit-Hartenberg en RoboAnalyzer

La configuración inicial, con ambas articulaciones a  $0^\circ$  puede observarse en la siguiente ilustración:



*Ilustración 140 Brazo de 2 eslabones en posición inicial*

Se realiza la simulación de la trayectoria desde la posición inicial (ambas articulaciones en  $0^\circ$ ) hasta la posición final (Articulación\_1 =  $180^\circ$  y Articulación\_2 =  $90^\circ$ ):



*Ilustración 141 Brazo de 2 eslabones en posición final y con trayectoria*

Con esta simulación, se generan una serie de gráficas con información muy detallada sobre la posición (en mm) y los ángulos (en grados sexagesimales).

En la siguiente ilustración se pueden observar las coordenadas X e Y del final del eslabón 1, donde se observa cómo éstas van cambiando a lo largo de la trayectoria:

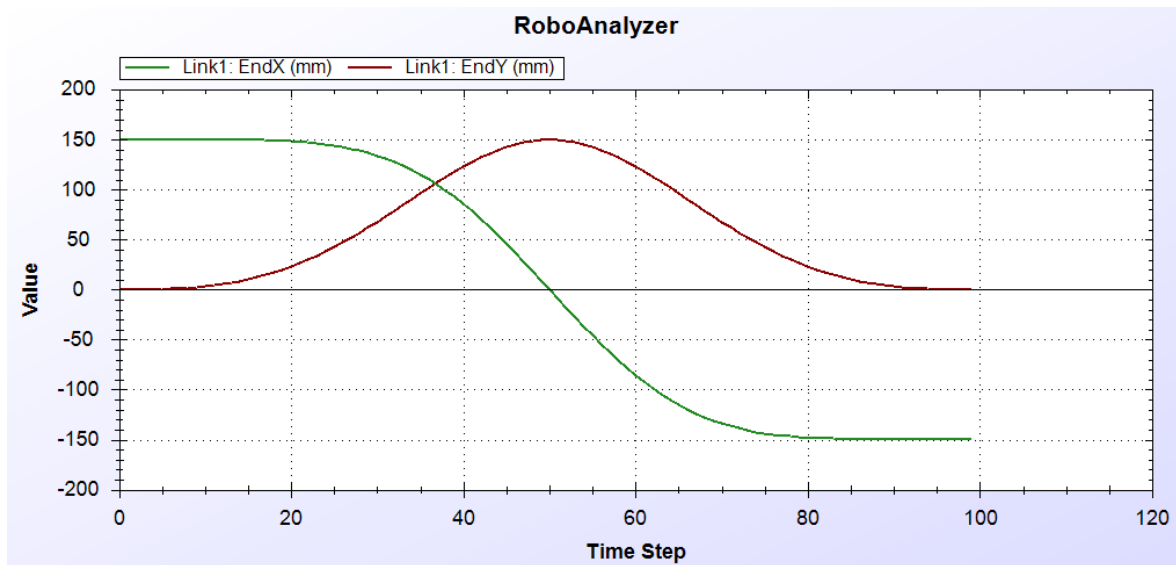


Ilustración 142 Posición trayectoria del final del eslabón 1 en X e Y

La siguiente ilustración también muestra la trayectoria en coordenadas X e Y, pero en este caso del final del eslabón 2. Es por ello que la posición inicial para la coordenada X es igual a 300 mm, ya que a los 150 mm de longitud del eslabón 2, se suman los 150 mm del eslabón 1, debido a que el origen de coordenadas se encuentra al inicio del eslabón 1:

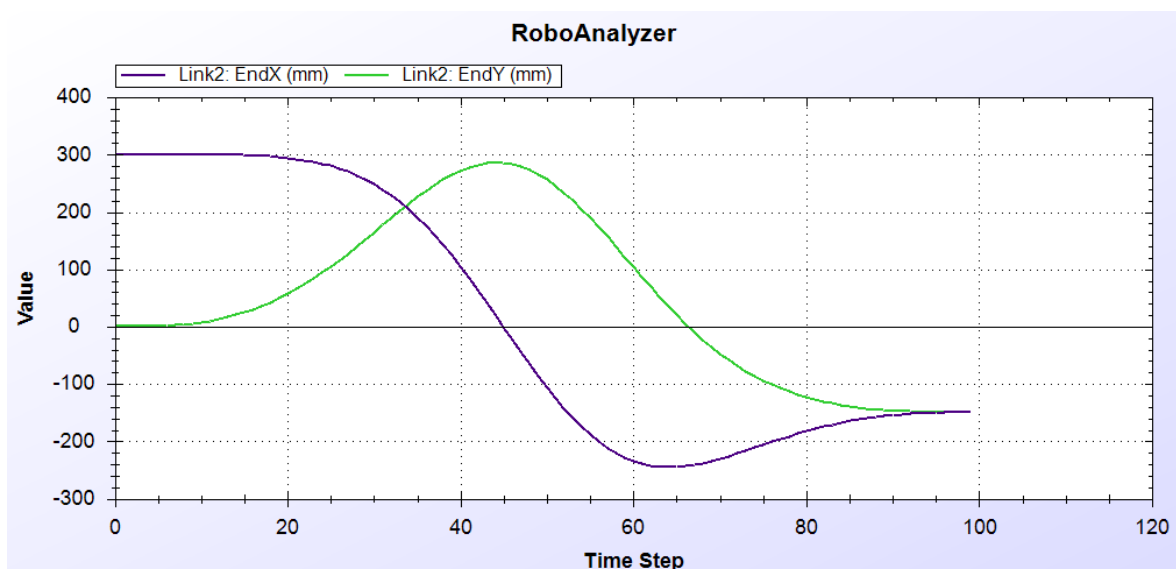


Ilustración 143 Posición trayectoria del final del eslabón 2 en X e Y

También es posible visualizar (aunque no es el objetivo principal de la cinemática directa) cómo cambian los ángulos de cada articulación según avanza la trayectoria hasta llegar a la posición final (Articulación\_1 = 180° y Articulación\_2 = 90°).

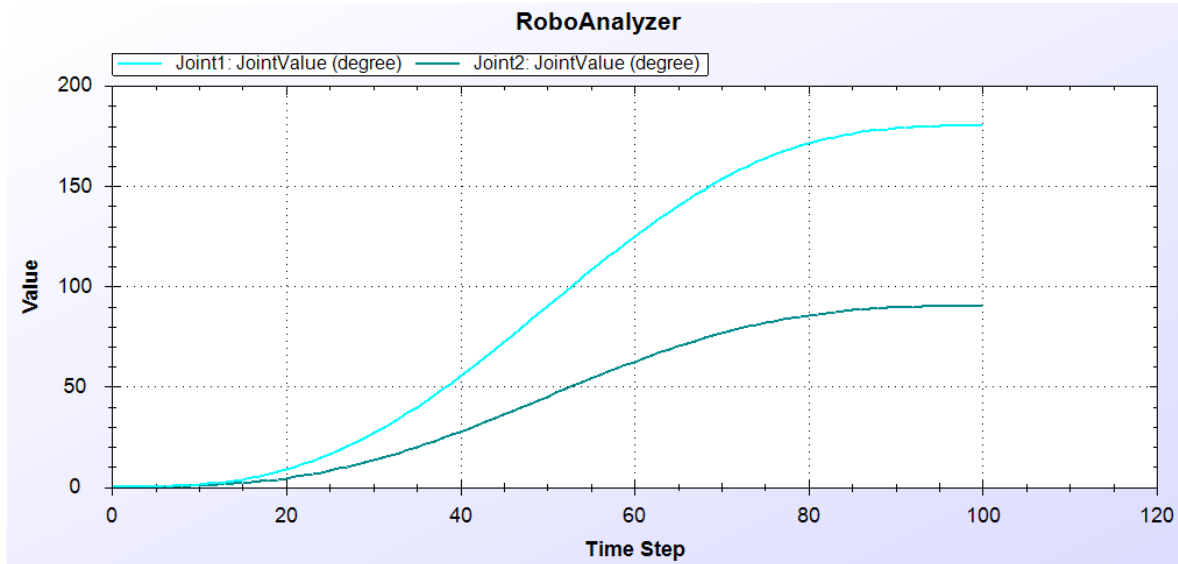


Ilustración 144 Cambio de ángulos en articulaciones según trayectoria

### 5.1.3 Cinemática Inversa mediante Software RoboAnalyzer

La cinemática inversa suele ser en el área de la robótica más importante, aún, que la cinemática directa. Esto se debe a que, normalmente, se suele saber la posición y orientación que interesa alcanzar en el actuador final para lograr un determinado fin o acción, pero no se sabe la posición que debe tener cada articulación para lograr que el actuador final se sitúe en esa posición. Para solucionar este problema se utiliza la cinemática inversa.

En la cinemática inversa se ha realizado, también, mediante el software de simulación RoboAnalyzer, una primera aproximación. Después, se ha calculado la cinemática inversa mediante el método geométrico.

En el software RoboAnalyzer, hay que recordar que, al igual que en el caso de la cinemática directa, se ha utilizado una configuración SCARA de dos grados de libertad y, por simplificar, solo se han añadido dos eslabones, ya que al ser una SCARA paralela, conocidos los parámetros de un brazo, el resto de parámetros del otro brazo también se conocen.

Los parámetros introducidos, así como los valores para Theta 1 y Theta 2 se observan en la siguiente ilustración:

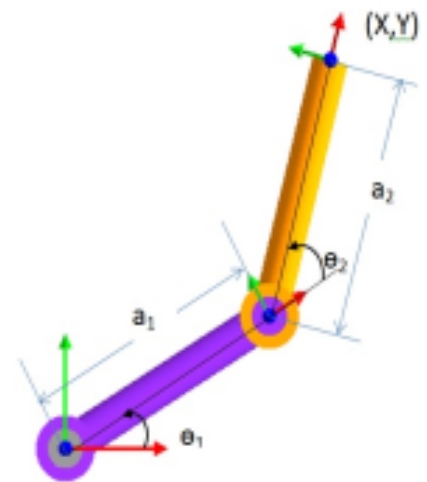
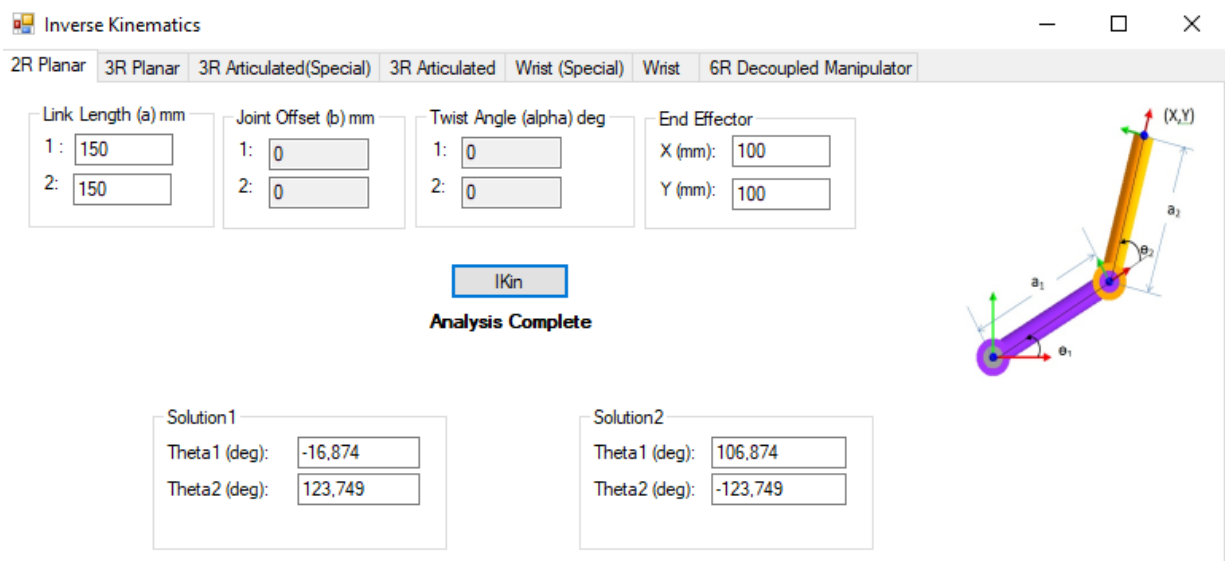


Ilustración 145 Configuración cinemática inversa



Inverse Kinematics			
2R Planar   3R Planar   3R Articulated(Special)   3R Articulated   Wrist (Special)   Wrist   6R Decoupled Manipulator			
Link Length (a) mm	Joint Offset (b) mm	Twist Angle (alpha) deg	End Effector
1: 150	1: 0	1: 0	X (mm): 100
2: 150	2: 0	2: 0	Y (mm): 100
IKin			
Analysis Complete			
Solution1		Solution2	
Theta1 (deg):	-16,874	Theta1 (deg):	106,874
Theta2 (deg):	123,749	Theta2 (deg):	-123,749

Ilustración 146 Parámetros datos y soluciones cinemática inversa mediante RoboAnalyzer



Mediante el software RoboAnalyzer se han simulado los resultados de Theta 1 y Theta 2 para una posición cualquiera del actuador final ( $X=100$  mm,  $Y=100$  mm).

Pero, a partir de aquí, se va a realizar un estudio de la cinemática inversa pero manualmente, mediante el método geométrico, donde se explicarán y detallarán las ecuaciones que se utilizan para hallar la cinemática inversa. Para despejar cualquier tipo de dudas, en el esquema se dibujarán los dos brazos (en vez de sólo uno como anteriormente).

#### 5.1.4 Cinemática inversa por método geométrico

A partir de la siguiente ilustración, donde se ven representados los dos brazos de la impresora 3D RepRap Morgan, se realiza la cinemática inversa mediante el método geométrico.

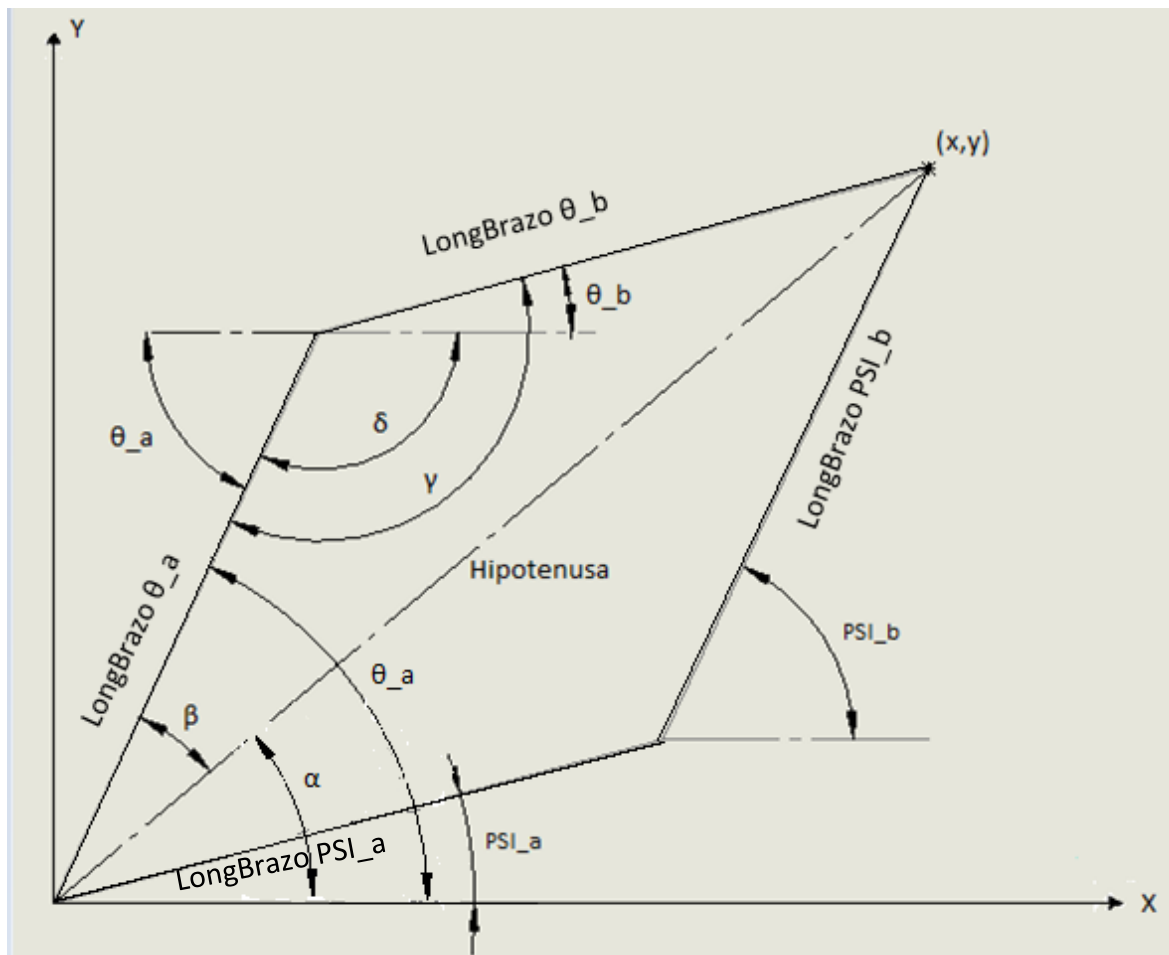


Ilustración 147 Cinemática inversa SCARA paralela Método geométrico

Es conocida la posición del actuador final, en las coordenadas  $(x,y)$ , así como las longitudes de los eslabones.

Se busca conocer los ángulos que debe tener cada articulación para esas coordenadas del actuador final; en concreto interesa hallar los datos de aquellas articulaciones que son movidas directamente por los motores paso a paso, es decir, los ángulos  $\text{PSI}_a$  y  $\theta_a$ .

El primer paso es hallar el valor de la hipotenusa del triángulo rectángulo formado por las coordenadas  $(x,y)$ :



$$\text{Hipotenusa}^2 = x^2 + y^2 \rightarrow \text{Hipotenusa} = \sqrt{x^2 + y^2}$$

A continuación, se obtiene el ángulo  $\alpha$ , formado por la hipotenusa con el eje de abscisas:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{y}{x} \rightarrow \alpha = \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)$$

A continuación, se aplica el teorema del coseno en el triángulo formado por los eslabones LongBrazo  $\theta_a$ , LongBrazo  $\theta_b$  y la Hipotenusa, para hallar el ángulo  $\beta$ , que queda definido por:

$$\begin{aligned} (\text{LongBrazo } \theta_b)^2 &= (\text{Hipotenusa})^2 + (\text{LongBrazo } \theta_a)^2 - 2 \cdot \text{Hipotenusa} \cdot \text{LongBrazo } \theta_a \cdot \cos(\beta) \rightarrow \\ \rightarrow 2 \cdot \text{Hipotenusa} \cdot \text{LongBrazo } \theta_a \cdot \cos(\beta) &= (\text{Hipotenusa})^2 + (\text{LongBrazo } \theta_a)^2 - (\text{LongBrazo } \theta_b)^2 \rightarrow \\ \rightarrow \cos(\beta) &= ((\text{Hipotenusa})^2 + (\text{LongBrazo } \theta_a)^2 - (\text{LongBrazo } \theta_b)^2) / (2 \cdot \text{Hipotenusa} \cdot \text{LongBrazo } \theta_a) \rightarrow \\ \beta &= \arccos(((\text{Hipotenusa})^2 + (\text{LongBrazo } \theta_a)^2 - (\text{LongBrazo } \theta_b)^2) / (2 \cdot \text{Hipotenusa} \cdot \text{LongBrazo } \theta_a)) \end{aligned}$$

Una vez conocidos, los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ , el ángulo  $\theta_a$  se obtiene como suma de ambos:

$$\theta_a = \alpha + \beta$$

Además, por ser una configuración paralela:

$$\text{PSI}_b = \theta_a$$

Se vuelve a aplicar el teorema del coseno, también, otra vez, para el triángulo formado por los eslabones LongBrazo  $\theta_a$ , LongBrazo  $\theta_b$  y la Hipotenusa, pero esta vez para hallar el ángulo " $\gamma$ ", por lo que:

$$\begin{aligned} (\text{Hipotenusa})^2 &= (\text{LongBrazo } \theta_a)^2 + (\text{LongBrazo } \theta_b)^2 - 2 \cdot \text{LongBrazo } \theta_a \cdot \text{LongBrazo } \theta_b \cdot \cos(\gamma) \rightarrow \\ \rightarrow 2 \cdot \text{LongBrazo } \theta_a \cdot \text{LongBrazo } \theta_b \cdot \cos(\gamma) &= (\text{LongBrazo } \theta_a)^2 + (\text{LongBrazo } \theta_b)^2 - (\text{Hipotenusa})^2 \rightarrow \\ \rightarrow \cos(\gamma) &= ((\text{LongBrazo } \theta_a)^2 + (\text{LongBrazo } \theta_b)^2 - (\text{Hipotenusa})^2) / (2 \cdot \text{LongBrazo } \theta_a \cdot \text{LongBrazo } \theta_b) \rightarrow \\ \rightarrow \gamma &= \arccos(((\text{LongBrazo } \theta_a)^2 + (\text{LongBrazo } \theta_b)^2 - (\text{Hipotenusa})^2) / (2 \cdot \text{LongBrazo } \theta_a \cdot \text{LongBrazo } \theta_b)) \end{aligned}$$



Una vez conocido el ángulo “ $\gamma$ ”, se obtiene  $\theta_b$  mediante:

$$\theta_b = \gamma - \delta$$

Donde:

$$\delta = 180^\circ - \theta_a$$

Por ser una configuración paralela:

$$***PSI_a = \theta_b = \gamma - \delta***$$

## 5.2 Cálculo de tolerancia dimensional del soporte exterior rodamiento para resistir esfuerzos radiales del acople

Durante el montaje y fabricación de la impresora RepRap Morgan, uno de los principales problemas ha sido el referido a rodamientos o tubos que debían encajar a presión en piezas impresas. En muchos casos, la pieza era introducida por apriete y, ya que debía ser una unión solidaria (por ejemplo, el tubo de cobre y la polea impresa) y tras un tiempo, ésta se daba de sí y se deformaba haciendo que tubo y agujero estuvieran con juego. En otros casos, el rodamiento era introducido a presión y se formaban al poco tiempo grietas. Varias veces ha habido que volver a imprimir piezas para solucionar este tipo de problemas.

Se ha realizado un estudio de tolerancia dimensional para la pieza más crítica en cuanto a deformaciones y grietas, la del eslabón ("Morgan arm Theta b), la cual tiene una unión crítica con el rodamiento de la articulación donde se encuentra el extrusor. Hubo que volver a imprimir la pieza porque tuvo rotura.

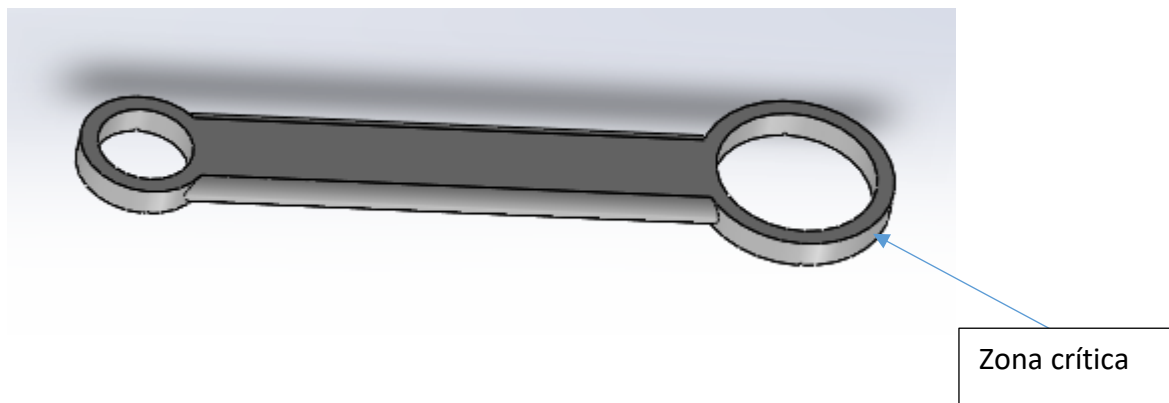


Ilustración 148 Zona crítica en Morgan arm Theta b con el rodamiento

La fuerza radial que ejerce el rodamiento se muestra en la siguiente imagen (en morado):

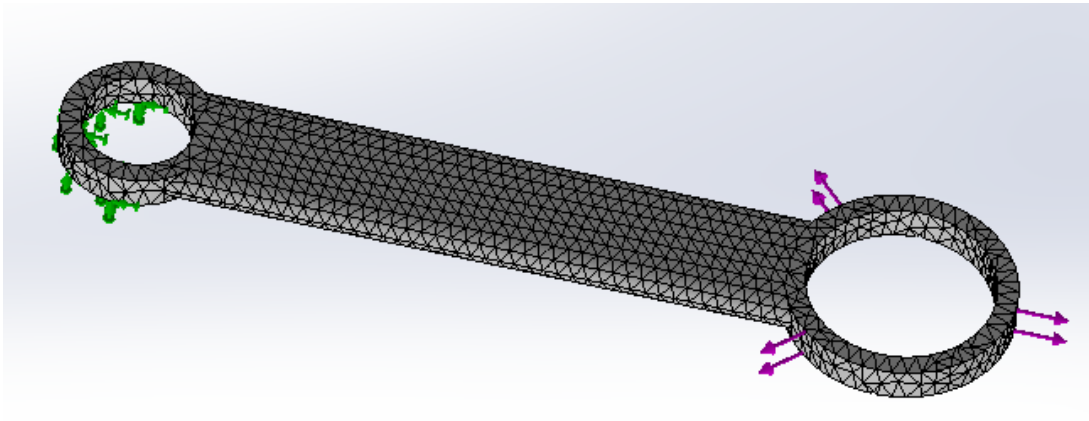


Ilustración 149 Esfuerzos radiales Morgan arm Theta b con el rodamiento

La pieza está impresa en PLA, cuyas propiedades de material son:

Propiedad	Valor	Unidad ^
Módulo elástico	3450000000	N/m <sup>2</sup>
Coeficiente de Poisson	0.394	N/D
Módulo cortante	1241000000	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	1250	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	54100000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión	5227300000	N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	50000000	N/m <sup>2</sup>
Coeficiente de expansión térmica	0.000135	/K

Ilustración 150 Propiedades PLA

El cálculo se realiza a partir de la fórmula del módulo elástico, la cual es:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

$E$  es el Módulo elástico o módulo de Young

$\sigma$  es la tensión ejercida sobre el área transversalmente

$\varepsilon$  es la deformación unitaria entendida como la relación entre el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial.

$$\varepsilon = \frac{\text{alargamiento}}{\text{longitud}}$$

Son conocidos  $E = 345 \cdot 10^7 \frac{N}{m^2}$ , el valor de la tensión del límite elástico  $\sigma = 50 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2}$

También se sabe que:

$$\varepsilon = \frac{\text{alargamiento}}{\text{longitud}} = \frac{\text{alargamiento}}{\pi \cdot D_0}$$

Donde la distancia del rodamiento  $D_0 = 0,037 \text{ m}$

A partir de la primera ecuación, se despeja:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \rightarrow \sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow \sigma = E \cdot \frac{\text{alargamiento}}{\pi \cdot D_0} \rightarrow \text{alargamiento} = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_0}{E} = 1,685 \cdot 10^{-3} \text{ m} \rightarrow \\ \rightarrow \text{alargamiento} = 1,685 \text{ mm}$$

Esto indica que la pieza en la cual introduciremos en su diámetro interior,  $\phi_i$ , el rodamiento, nunca debe ser menor de:

$$\phi_i = 37 - 1,685 = 35,315 \text{ mm}$$

## 5.3 Análisis por elementos finitos

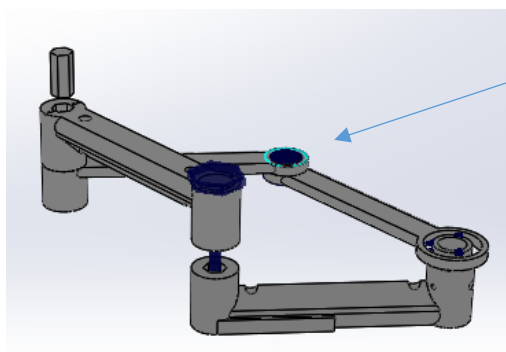
### 5.3.1 Estudio de la configuración de los brazos

En este apartado se compara la tensión y deformación que recibiría un brazo si la configuración fuera SCARA “pura”, con la que recibe uno de los dos brazos en la configuración SCARA paralela. En el primer caso, el brazo tiene que soportar todo el peso del extrusor y, además, la articulación intermedia debe soportar el peso del motor que movería el segundo eslabón.

Para poder comparar mejor ambos casos, se ha simplificado la simulación para el caso SCARA paralela, de modo que no se simularán los dos brazos, sino sólo uno con la mitad del peso del extrusor. Ese mismo brazo, simulará ser una configuración de SCARA “pura” y, de esta forma, se introducirá el peso de un motor en la segunda articulación, que es la articulación que se encarga de mover el segundo eslabón en este tipo de configuración, en vez de estar los dos motores al principio de la configuración.

Se han determinado las masas de los diferentes componentes:

- Masa extrusor E3D V6 = 0,1 kg
- Masa motor paso a paso (NEMA 17) = 0,286 kg



Se simula este brazo para los dos supuestos

*Ilustración 151 Simplificaciones de simulación SCARA paralela*

Debido a que no se encuentra definido el PLA en la librería de SolidWorks, se definen las propiedades manualmente, utilizando como fuente las propiedades que define el programa Ansys:







Properties of Outline Row 73: Polylactic acid (PLA)			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	1250	kg m <sup>-3</sup>
3	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
4	 Coefficient of Thermal Expansion	0,000135	C <sup>-1</sup>
5	 Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's...	
7	Young's Modulus	3,45E+09	Pa
8	Poisson's Ratio	0,39	
9	Bulk Modulus	5,2273E+09	Pa
10	Shear Modulus	1,241E+09	Pa
11	 Tensile Yield Strength	5,41E+07	Pa
12	 Tensile Ultimate Strength	5,92E+07	Pa

Ilustración 152 Propiedades del Ácido Poliáctico o PLA (Fuente: Ansys)

Se introducen los datos en SolidWorks para definir las propiedades del material PLA:

Propiedad	Valor	Unidad ^
Módulo elástico	3450000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.394	N/D
Módulo cortante	1241000000	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	1250	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	54100000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión	5227300000	N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	50000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	0.000135	/K

Ilustración 153 Propiedades PLA (Fuente: Ansys)

Se va a simular en un brazo, el peso que recibe un brazo siendo configuración SCARA paralela, por lo que se va a considerar el peso referente a la mitad del extrusor:

$$F = 0,05 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,49 \text{ N} \approx 0,5 \text{ N}$$

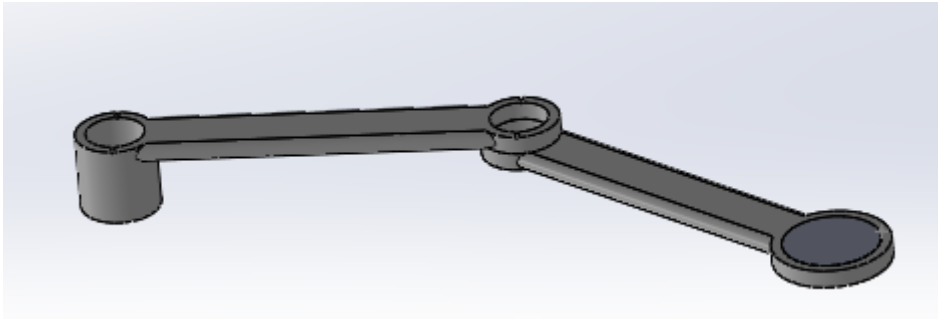


Ilustración 154 Brazo "arm Theta" a simular

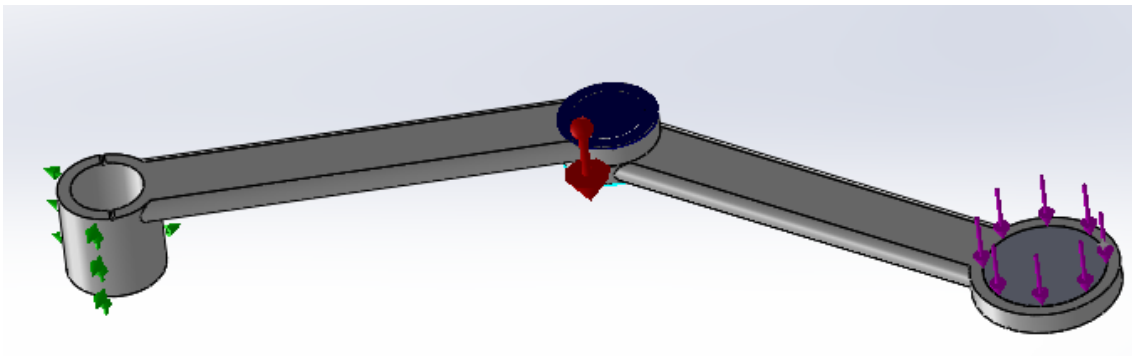


Ilustración 155 Brazo "arm Theta" con sujeción, cargas y pasador en caso de SCARA paralela



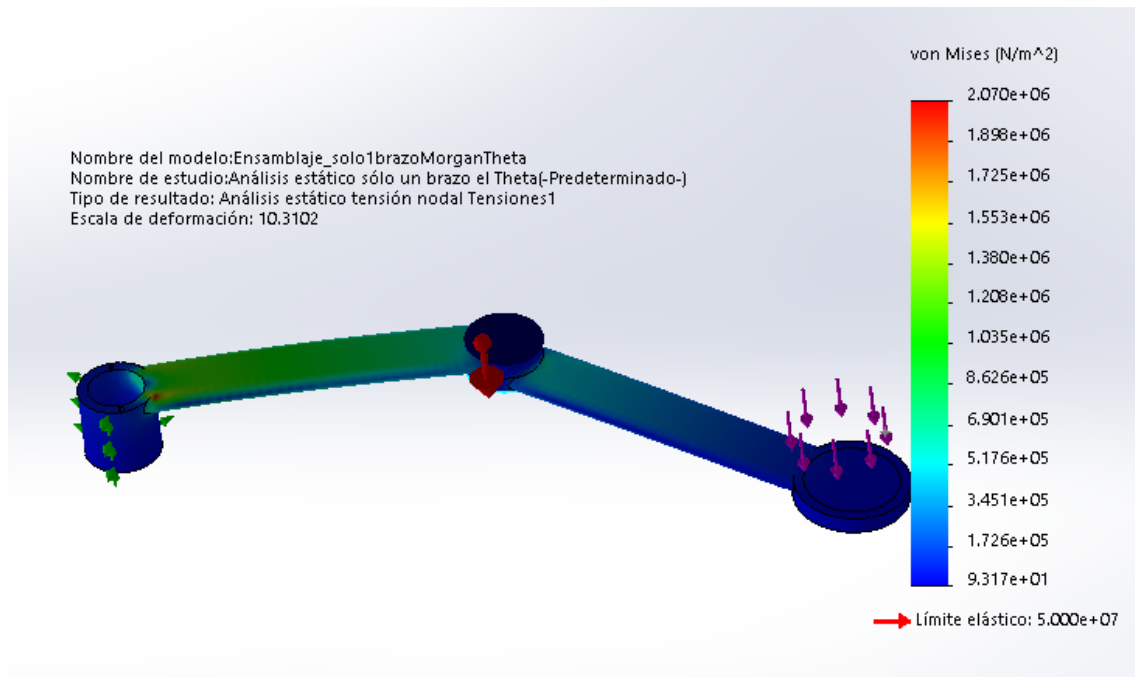


Ilustración 156 Tensiones de von Mises en configuración SCARA paralela

No se aprecian tensiones críticas, hay un factor de seguridad suficientemente alto.

Sobre las deformaciones, en un brazo que estuviera en configuración SCARA paralela, los resultados de simulación son:

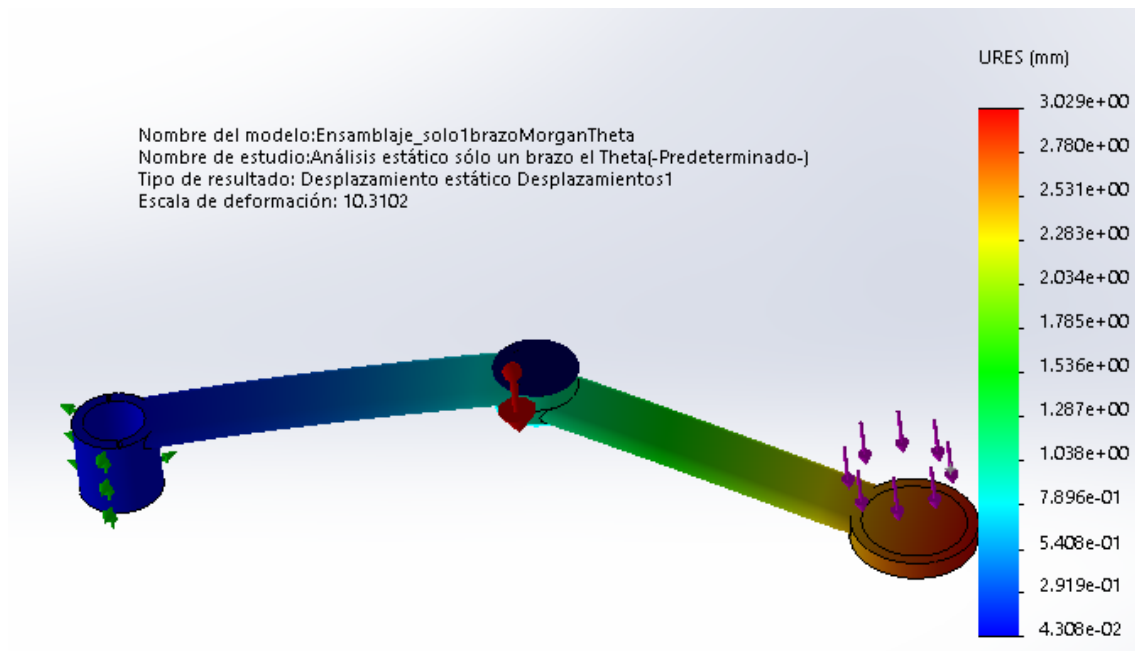


Ilustración 157 Deformaciones en configuración SCARA paralela

Sí se aprecian valores más considerables, llegando a haber hasta 2,78 mm en zonas muy alejadas del eje de apoyo. Hay que tener en cuenta que la posición del brazo se ha elegido en un ángulo cercano a 180º, ya que ésta es la posición más desfavorable.

A continuación, se va a simular el mismo brazo, pero suponiendo éste como configuración SCARA (no paralela), por lo que todo el peso del extrusor (0,1 kg) se tiene en cuenta, en vez de repartirse la mitad del peso.

Además, hay que considerar los 0,286 kg del motor que habría en la segunda articulación, en el caso de ser configuración SCARA.

Por lo tanto, en este caso hay que incorporar en la simulación dos fuerzas (además de la gravedad):

$$F_1 = 0,1 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0,98 \text{ N} \approx 1 \text{ N}$$

$$F_2 = 0,286 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 2.8 \text{ N}$$

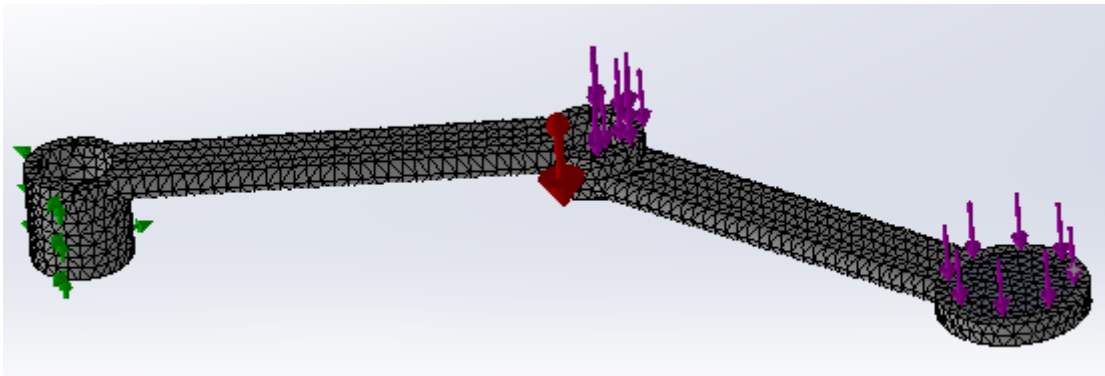


Ilustración 158 Cargas en configuración SCARA "pura"

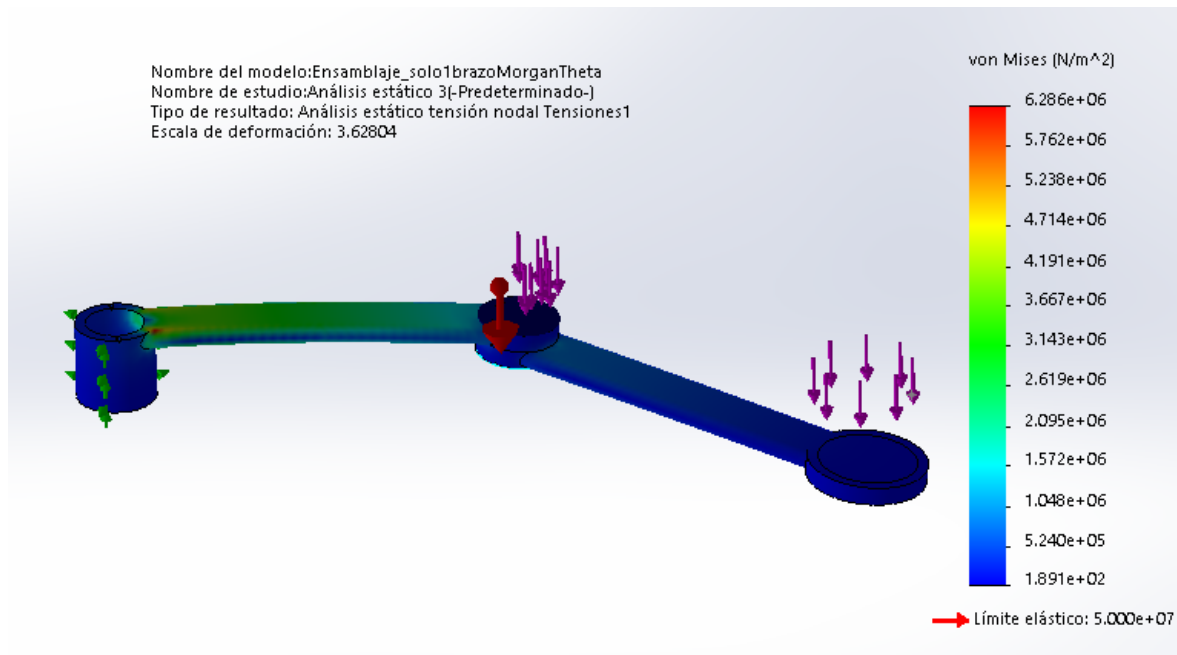


Ilustración 159 Tensión de von Mises en configuración SCARA "pura"

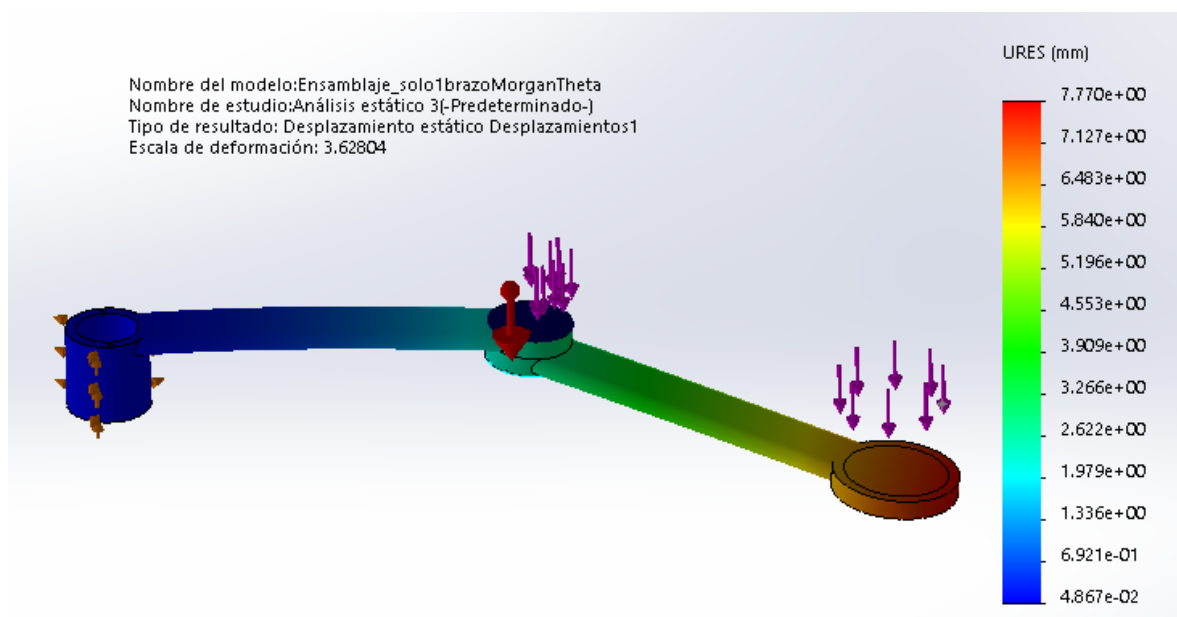


Ilustración 160 Deformaciones en configuración SCARA "pura"

Como era de esperar, se confirma que en este caso se produce más deformación que para la SCARA paralela.

Este estudio se realiza sólo para conocer los puntos críticos de los brazos, siendo éste muy simplificado, ya que se ha realizado mediante Solidworks Simulation, donde se consideran las piezas como si hubieran sido fabricadas por inyección, cuando en realidad han sido creadas por impresión 3D, mediante deposición fundida. No se ha prestado especial atención a la precisión de los resultados numéricos, ya que este estudio estaba centrado en demostrar que sufre más tensión y deformación un brazo SCARA, que la configuración SCARA paralela, así como saber los posibles puntos críticos, lo cual ha quedado confirmado.

Para el caso particular, realmente no es problema el peso del extrusor, pero en el caso de querer realizar esta impresora con brazos de mayor longitud y/o añadiendo más de un extrusor, el aumento de las tensiones y deformaciones podría ser considerable.

### 5.3.2 Estudio de los brazos con un material alternativo

En el apartado anterior se ha simulado una SCARA “pura”, comparándola con las inferiores cargas que debe soportar la configuración SCARA paralela.

En este apartado, debido a los resultados de la configuración SCARA “pura” con brazo de PLA del apartado anterior, donde obtuvo una alta tensión y, sobre todo, alta deformación, en este apartado se va a simular esta misma configuración, pero con un material que sea menos deformable, para intentar obtener mejores resultados.

En concreto se utiliza el AISI 316L Acero inoxidable, cuyas propiedades son:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+11	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.265	N/D
Módulo cortante	8.2e+10	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	8027	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	485000000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión		N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	170000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	1.65e-05	/K
Conductividad térmica	14.6	W/(m·K)

Ilustración 161 Propiedades del material AISI Acero inoxidable

Los resultados para la tensión de von Mises son:

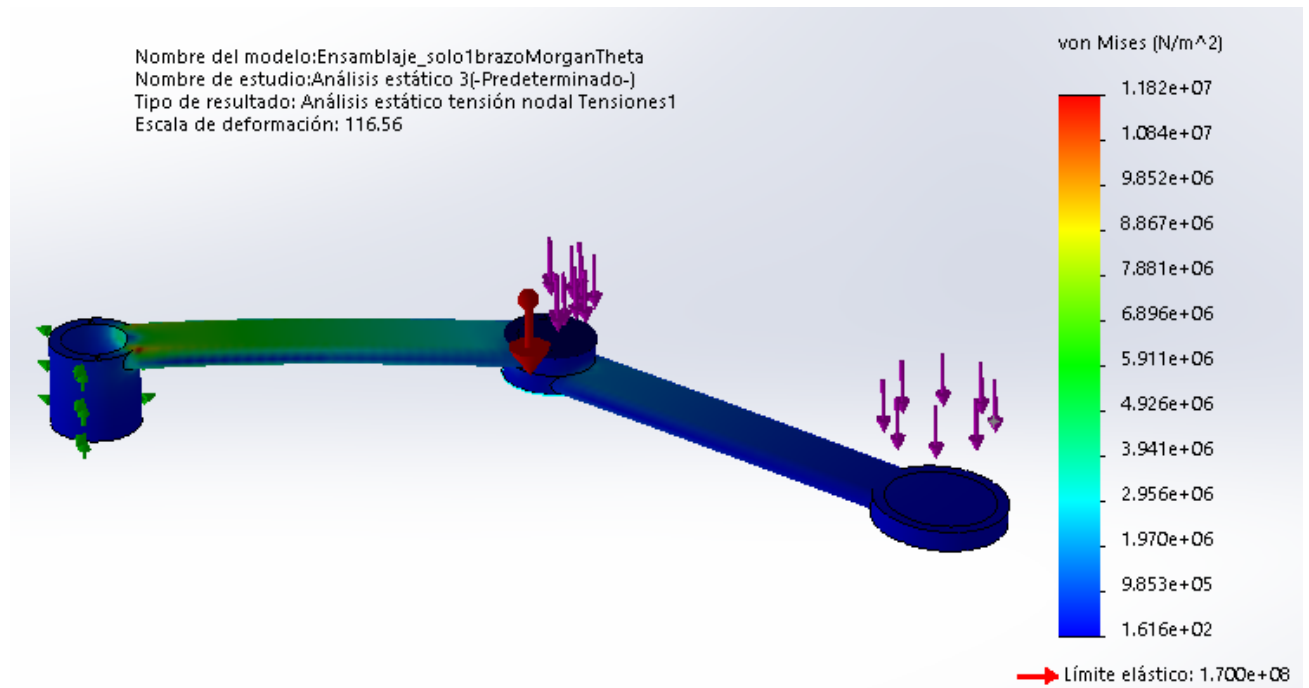


Ilustración 162 Tensión de von Mises con AISI 316L Acero inoxidable

Las deformaciones son:

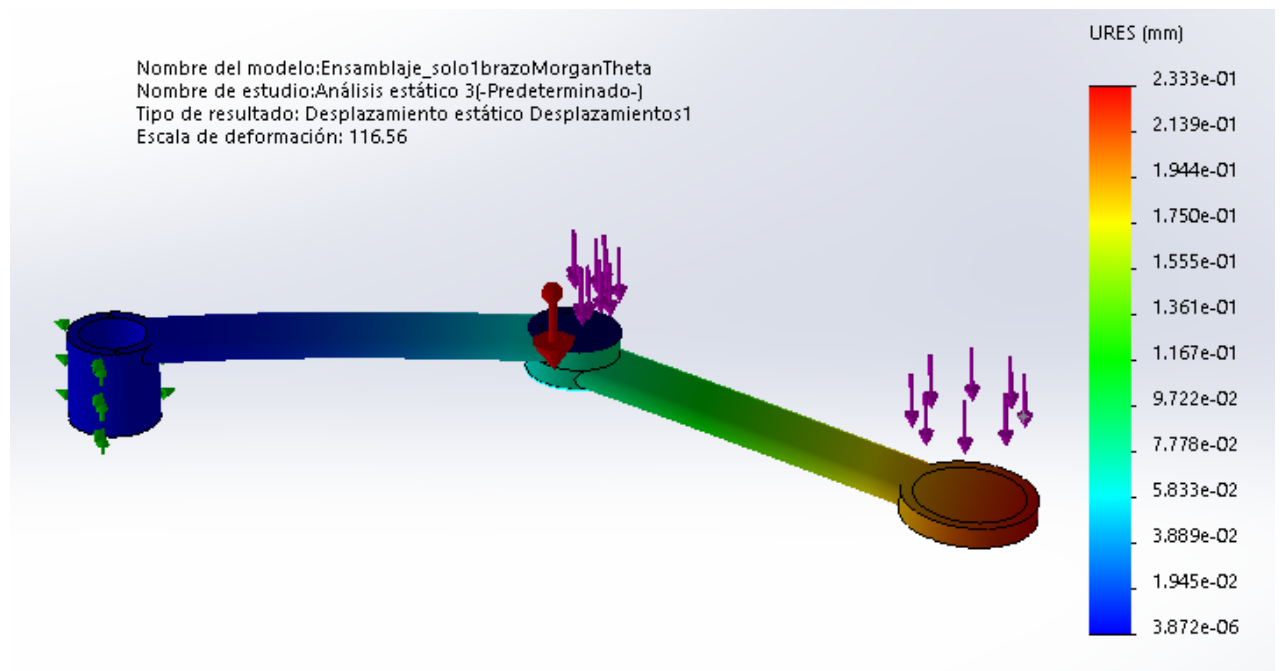


Ilustración 163 Deformaciones AISI 316L Acero inoxidable



Los resultados son más favorables que con PLA, haciendo que con AISI 316L Acero inoxidable sea posible la configuración SCARA. No obstante, este material es más difícil de trabajar y, además,

## 6 Conclusiones

En conclusión, se puede decir que todos los objetivos iniciales han sido en mayor o menor medida cumplidos.

Se ha realizado la fabricación y montaje de la impresora RepRap Morgan,

Se ha creado una guía básica de impresión 3D, de forma que se aúnan conocimientos muy dispares pero de lo que todos tienen alguna relación con la impresión 3D o el modelo de impresora de este trabajo en particular.

También se ha podido aportar información extra sobre la impresora, estudiando su cinemática, las propiedades materiales de algunas piezas y, también, mirando y detallando las características de este modelo, posibles problemas, ventajas y desventajas, etc., para lo cual se han utilizado en algunos casos técnicas aprendidas durante la carrera.

En mi opinión, creo que al ser un trabajo que se ha visto materializado (construido) en la realidad, permite enfrentarse a problemas del día a día que pueden producirse en un proyecto de una fábrica o empresa, tales como: falta de disponibilidad de una pieza o componente, lo cual retrasa toda la programación inicial; enfrentarse a imprevistos, como que se rompa una pieza o no conseguir hacer que funcione un determinado componente. También creo que este trabajo me ha permitido experimentar en primera persona todo el proceso lógico de un proyecto, empezando por la viabilidad técnica y económica, la logística y pedidos, presupuesto, la fabricación de componentes, el montaje, planos y otros apartados previos y/o posteriores como estudios sobre las características de la impresora y sobre otras posibles alternativas. Además, se ha requerido de cierto conocimiento en muchas áreas diferentes como mecánica, electrónica, electricidad, programación, etc.



## 7 Futuras líneas de trabajo

Ampliaciones y trabajos que se podrían hacer sobre la impresora RepRap Morgan serían:

- Realizar un Análisis de Elementos Finitos en mayor detalle y siendo más restrictivo y preciso a la hora de realizar mallas o colocar sujeciones, comparando a todas las piezas de PLA que sufran alguna tensión, con resultados realizados para los mismos modelos pero con otros materiales.
- Realizar un estudio de las tolerancias dimensionales para los rodamientos y piezas de encaje como tubos, etc. Está relacionado, en parte, con el punto anterior.
- Realizar un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del material de impresión utilizado (PLA) comparando éste con otros posibles materiales de impresión, para comparar el impacto ambiental de cada uno y tenerlo en cuenta como posible factor de selección para la creación de un número elevado de impresoras. Mediante softwares como OpenLCA (software libre) o SimaPro (software no gratuito).
- Ampliar las dimensiones de la impresora para aumentar el espacio de trabajo:
  - En el eje Z, lo cual sería relativamente sencillo ampliando la longitud del husillo y, en caso de requerirse, de los tubos de PVC.
  - En el área de impresión (plano horizontal XY), para lo cual habría que aumentar las dimensiones de la cama caliente y la longitud de los brazos para que llegaran a todos los puntos del área de impresión. Además, habría que tener en cuenta posibles complicaciones de estabilidad de la estructura y de rotura de los brazos al aumentar el momento de la fuerza realizada por el peso del extrusor, por lo que se requerirían de simulaciones y análisis (Elementos Finitos) para demostrar que son viables estos cambios en la impresora.

Otras líneas de trabajo futuras:

- Investigación y revisión del estado del arte sobre la posibilidad de realizar impresión 3D con robots con más de 3 grados de libertad, en concreto orientado hacia 6 grados de libertad. Realizar viabilidad técnica y económica.

## 8 Bibliografía

- [1] V. Gupta, R. G. Chittawadigi, y S. K. Saha, «RoboAnalyzer», n.º March, pp. 1-5, 2017.
- [2] F. C. Park, «Encyclopedia of Systems and Control», *Encycl. Syst. Control*, 2013.
- [3] M. T. Andrago Correa, «Diseño E Implementación De Un Post-Procesador Generador De Códigos G Para Un Torno Cnc Romi C 420», p. 244, 2016.
- [4] R. Valverde, «Impresoras 3D: Marco teórico, modelos de desarrollo y campos de aplicación», *Cuenca Univ. Castilla-La Mancha Blender [en línea][Consulta 16 febrero 2012]* Dispon. en <http://www.blender.org>, 2009.
- [5] R. Carlos y G. Gómez, «Transformación de Denavit-Hartenberg (algoritmo)».
- [6] J. Wrege y R. Slatter, «DESIGN OF A PARALLEL HYBRID MICRO-SCARA ROBOT FOR HIGH PRECISION ASSEMBLY Arne Burisch», *Micro*.
- [7] J. Francolí Fontrodona y R. B. Díaz, «Artículos de economía industrial Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D», *Artículos Econ. Ind.*, 2014.
- [8] V. Morales, M. Tutor, y M. Sánchez López, «Desarrollo de un controlador básico de impresión 3D Grado en Ingeniería Informática», 2016.
- [9] F. N. Womack, W. a. Hollerman, S. M. Goedeke, N. P. Bergeron, S. W. Allison, y M. R. Cates, *Parallels Robot*. 2004.
- [10] Q. Harley, «qharley (Quentin Harley) · GitHub». [En línea]. Disponible en: <https://github.com/qharley>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [11] R. Kuhlmann, «RepRap Morgan - RepRap». [En línea]. Disponible en: [https://reprap.org/wiki/User:RobertKuhlmann/RepRap\\_Morgan](https://reprap.org/wiki/User:RobertKuhlmann/RepRap_Morgan). [Accedido: 03-jul-2019].
- [12] «RepRap Morgan - RepRap». [En línea]. Disponible en: [https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Morgan](https://reprap.org/wiki/RepRap_Morgan). [Accedido: 03-jul-2019].
- [13] Q. Harley, «Morgan Start-up and Calibration Guide - Morgan 3D Printers». [En línea]. Disponible en: <http://www.morgan3dp.com/morgan-calibration-guide/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [14] J. Flynt, «Cartesian, Delta, and Polar 3D Printers: What are They and What's the Difference? - 3D Insider», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/>. [Accedido: 03-jul-2019].

- [15] 3D NeWorld, «La guía de impresión de estereolitografía (SLA) en 3D - 3D Newworld», 2018. [En línea]. Disponible en: <http://3dnewworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [16] 3Dnatives, «Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesiana, Polar y Brazo robótico - 3Dnatives», 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [17] D. Goldeberg, «History of 3D Printing: It's Older Than You Think [Updated]». [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [18] A. Sánchez, «Impresoras 3D Cartesianas vs. impresoras 3D Delta | DIWO». [En línea]. Disponible en: <http://diwo.bq.com/impresoras-3d-cartesianas-vs-delta/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [19] «RepRap Calculator - Prusa Printers». [En línea]. Disponible en: <https://blog.prusaprinters.org/calculator/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [20] J. Loureiro, «Guía detallada para configurar Marlin [ACTUALIZADO Junio 2018]». [En línea]. Disponible en: [https://www.staticboards.es/blog/marlin-instalacion-configuracion/#Que\\_es\\_Marlin\\_y\\_para\\_que\\_sirve](https://www.staticboards.es/blog/marlin-instalacion-configuracion/#Que_es_Marlin_y_para_que_sirve). [Accedido: 03-jul-2019].
- [21] J. Loureiro, «Guía detallada para configurar Marlin [ACTUALIZADO Junio 2018]». [En línea]. Disponible en: <https://www.staticboards.es/blog/marlin-instalacion-configuracion/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [22] «Endstop - RepRap». [En línea]. Disponible en: <https://reprap.org/wiki/Endstop>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [23] «Marlin Firmware». [En línea]. Disponible en: <http://marlinfw.org/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [24] Core3D, «Wiring 3D Printer RAMPS 1.4: 12 Steps (with Pictures)». [En línea]. Disponible en: <https://www.instructables.com/id/Wiring-3D-Printer-RAMPS-14/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [25] «Qué es par motor y pautas para calcularlo correctamente». [En línea]. Disponible en: <http://www.mootio-components.com/blog/es/que-es-par-motor/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [26] «Glosario de Impresión 3D. Palabras con E y F en español e inglés». [En línea]. Disponible en: <https://trimaker.com/diccionario-impresion-3d-palabras-definiciones-terminos-trimaker/>. [Accedido: 03-jul-2019].

- [27] J. Loureiro, «Guía definitiva para comprar motores. Qué hay que saber.» [En línea]. Disponible en: <https://www.staticboards.es/blog/motores-paso-paso/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [28] «Impresoras 3D y componentes al mejor precio y calidad - i3Dlc Impresoras 3D». [En línea]. Disponible en: <https://impresoras3dlowcost.com/>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [29] S. Jian, S. John, C. Cheng Yin, C. Luc Rolland, y C. Lesley James, «FIVE BAR PLANAR MANIPULATOR SIMULATION AND ANALYSIS BY BOND GRAPH», 2014.
- [30] J. Legarreta, R. Martinez, y M. Jacobiana, «MODELADO GEOMÉTRICO Y CINEMÁTICO DEL ROBOT».
- [31] «Curso Basico de Blender». [En línea]. Disponible en: <https://www.esi.uclm.es/www/cglez/fundamentos3D/index.html>. [Accedido: 03-jul-2019].
- [32] «RepRap Magazine Issue 3 by Gary Hodgson - issuu».
- [33] «Modeling and Simulation of a 3D Printer Based on a SCARA Mechanism», 2016. [En línea]. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-30614-8\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-30614-8_5). [Accedido: 03-jul-2019].
- [34] R. Joli, «PROFESSIONAL PROGRAMME OF STUDY IN MECHATRONICS DESIGN AND CONTROL OF A PARALLEL SCARA ROBOT», n.º July, 2018.

## 9 Softwares y programas utilizados

- Ultimaker Cura
- Repetier-Host
- Marlin
- Arduino IDE
- Marlin
- SolidWorks
- RoboAnalyzer



## ANEXOS

## ANEXO A: Lista de materiales

### Piezas impresas

Piezas impresas	Cantidad	Obsevaciones
01-pvc_pipe_support_a (Ported)	4	Impreso
02-pvc_pipe_support_b (Non Ported)	4	Impreso
03-z_mount_bottom_8mm	1	Impreso
04-z_mount_top_8mm	1	Impreso
05-motormount_short	1	Impreso
06-motormount_tall	1	Impreso
07-drivewheel_rod	1	Impreso
08-drivewheel_tube	1	Impreso
09-22mm_6805_bearing_adaptor	1	Impreso
10-bed_arm_left_8mm	1	Impreso
11-bed_arm_right_8mm	1	Impreso
12-bed_z_mount_bracket	1	Impreso
13-bed_rear_mountclips	2	Impreso
14-bed_front_mountclips	2	Impreso
15-hall_endstop_holder	3	Impreso
16-leadscrew_shaft_motor_mount	1	Impreso
17-Morgan_arm_PSI_a	1	Impreso
18-Morgan_arm_PSI_b	1	Impreso
19-Morgan_arm_Theta_a	1	Impreso
20-Morgan_arm_Theta_b	1	Impreso
21-Morgan_toolhead	1	Impreso
22-Leadscrew-nut_Alpen8mmSDS	2	Impreso
23-extruder_bowden_adaptor	1	Impreso

## Tornillería y otros

Nombre	Cantidad	Observaciones
M8 tuerca	12	
M8 arandela	6	
M8 arandela tipo Grower	10	
M8 arandela 28mm	6	
M4 tuerca	9	
M4 tornillo 40mm	8	
M4 tornillo 80mm	1	
M8 tuerca antiblocante	6	
M8 tornillo 40mm	3	
M8 tornillo 100mm	1	
M8 tornillo 60mm	1	
2mm tirafondo, 40mm	2	
Tubo de cobre DE: 15mm, long. 440mm	1	Cobre, latón o similares
Tubo de cobre DE: 15mm, long. 200mm	2	Cobre, latón o similares
Tubo de cobre DE: 22mm, long. 460mm	1	Cobre, latón o similares
Muelle duro de compresión 7mm	1	
Perno 5mm	10	
M3 tuerca	3	
M3 tornillo de fijación 6mm (o tornillo adecuado)	3	
Cinta Kapton	1	
Ramps 1.4 Board	1	





## Componentes y electrónica

Nombre	Cantidad	Observaciones
Tubería de PVC, D.E: 32mm, long.459mm	2	
Tubería de PVC, D.E: 32mm, long 452mm	2	
Rodamiento de bolas 6805z	2	
Rodamiento Lineal LM8uu	5	
Chapa de aluminio (222x222x3 mm)	2	
Sensor de efecto Hall (A3144)	3	
Electrónica (cables, conectores Dupont)	1	
PTFE tubo 6mm 600mm	1	
CRISTAL 200X222X3MM	1,00	
SISTEMA DE EMPUJE MK8 BOWDEN	1,00	
HEATBED 20X20CM SILICONA 220V	1,00	
HOTEND E3D V6 FULL KIT - 1.75MM	1,00	
12V 30A - 360W FUENTE DE ALIMENTACIÓN	1,00	
NEMA 17 - 5.5KG-CM MOTOR PASO A PASO	1,00	
NEMA 17 4.4 KG-CM MOTOR PASO A PASO	4,00	
3D Kit de impresora partes: Ramps 1.4 MEGA2560, A4988, LCD 12864, controlador para Arduino compatible mega 2560 R3 para rewrap	1,00	
Correa T2.5	1,00	
POLEA T2.5 16 DIENTES 5MM	2,00	
TUBO PTFE 2*4MM	1,00	
Acoplador flexible 5x8 mm	3,00	
Rodamiento 608zz	5	
Muelle 22x7mm	4,00	
TUERCA ANTI-BACKSLASH para HUSILLO T8	1,00	
VARILLA CALIBRADA M8 (MÉTRICA 8MM)	1,00	
HUSILLO T8 350MM	1,00	
Madera MDF (1200x600x10 mm)	1	
Relé 12V	1	



Zócalo Relé	1	
-------------	---	--

## ANEXO B: Presupuesto

### Piezas impresas

NOMBRE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO [€]	PRECIO TOTAL [€]
Bobina PLA Tech Ultramarino- Diameter 1,75 mm	2	18,95	37,9

### Tornillería y otros

NOMBRE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO [€]	PRECIO TOTAL [€]
Tornillería y otros	1	15	15

### Componentes y electrónica

NOMBRE	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO [€]	PRECIO TOTAL [€]	PROVEEDOR
Tubería de PVC D.E: 32mm, long. 459mm	2	-	2,19	Leroy Merlin (2,19 € por 2 m long.)
Tubería de PVC D.E: 32mm, long 452mm	2	-	2,19	Leroy Merlin (2,19 € por 2 m long.)
Rodamiento de bolas 6805z	2	3,96	7,92	Amazon
Rodamiento Lineal LM8uu	5	0,99	4,95	I3Dlc
Chapa de aluminio (222x222x3 mm)	2	5	10	Lumetal plastic
Sensor de efecto Hall (A3144)	3	0,9	2,7	"Electrónica de Luis"
Electronica (cables, conectores Dupont)	1	5,5	5,5	"Electrónica de Luis"
PTFE tube 6mm 600mm	1	3	3	I3Dlc
CRISTAL 200X222X3MM	1,00	3,75	3,75	I3Dlc
SISTEMA DE EMPUJE MK8 BOWDEN	1,00	19,95	19,95	I3Dlc
HEATBED 20X20CM SILICONA 220V	1,00	24,95	24,95	I3Dlc
HOTEND E3D V6 FULL KIT - 1.75MM	1,00	69,95	69,95	I3Dlc
12V 30A - 360W FUENTE DE ALIMENTACIÓN	1,00	27,99	27,99	I3Dlc
NEMA 17 - 5.5KG-CM MOTOR PASO A PASO	1,00	14,99	14,99	I3Dlc
NEMA 17 4.4 KG-CM MOTOR PASO A PASO	4,00	13,95	55,8	I3Dlc

3D Kit de impresora partes ramps 1.4 MEGA2560 A4988 LCD 12864 controlador para Arduino compatible mega 2560 R3 para rebrap	1,00	31,22	31,22	AliExpress
Correa T2.5	1,00	7,50	7,5	I3Dlc
POLEA T2.5 16 DIENTES 5MM	2,00	7,90	15,8	I3Dlc
TUBO PTFE 2*4MM	1,00	3,18	3,18	I3Dlc
Acoplador flexible 5x8 mm	3,00	3,35	10,05	I3Dlc
Rodamiento 608zz	5	0,99	4,95	I3Dlc
Muelle 22x7mm	4,00	0,30	1,2	I3Dlc
TUERCA ANTI-BACKSLASH para HUSILLO T8	1,00	4,95	4,95	I3Dlc
VARILLA CALIBRADA M8 (MÉTRICA 8MM)	1,00	4,78	4,78	I3Dlc
HUSILLO T8 350MM	1,00	11,55	11,55	I3Dlc
Madera MDF (1200x600x10 mm)	1	7,25	7,25	Leroy Merlin
Relé 12V	1	4,95	4,95	"Electrónica de Luis"
Zócalo Relé	1	4,45	4,45	"Electrónica de Luis"
		TOTAL	367,66	

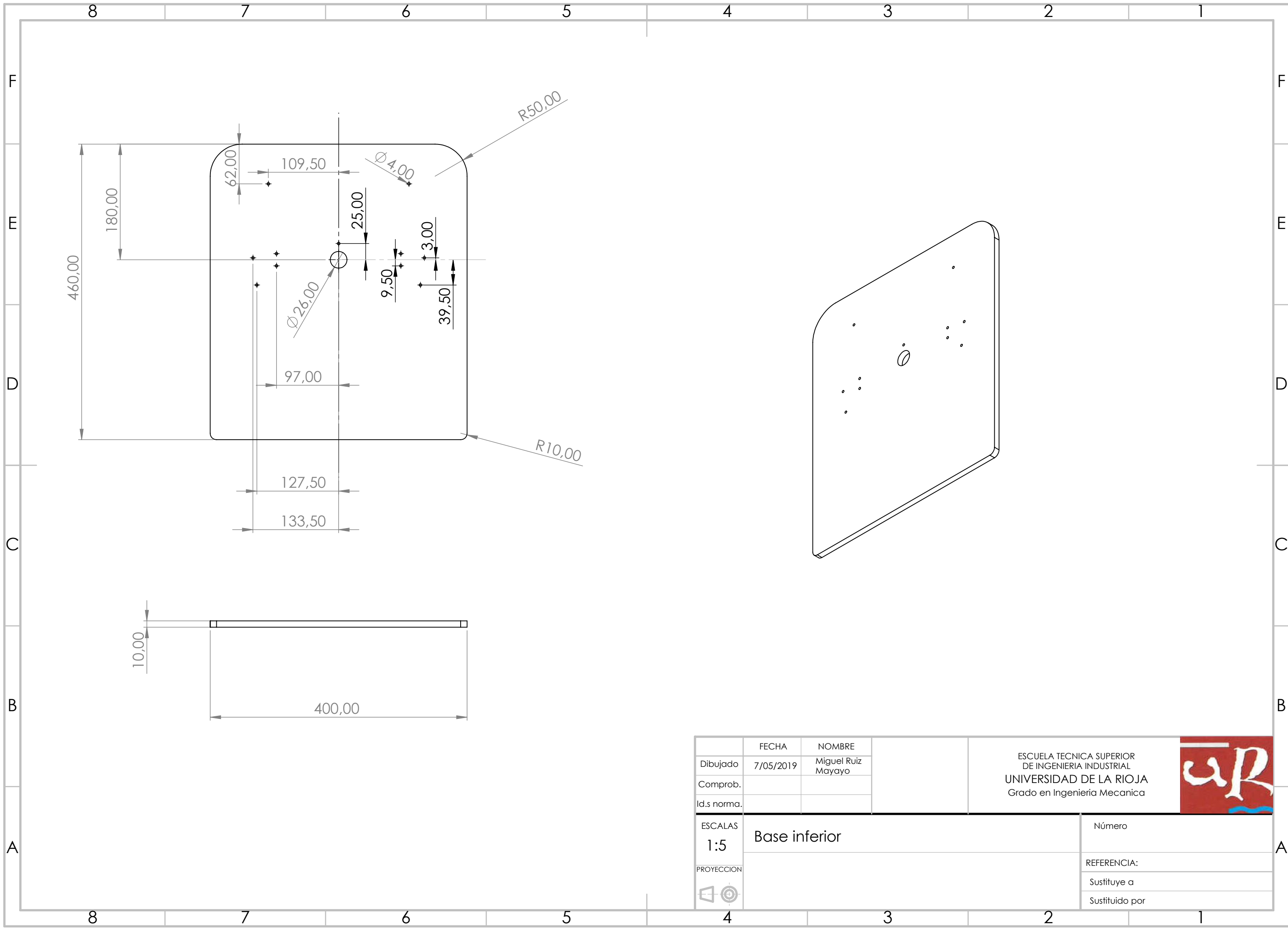
### Resumen presupuesto

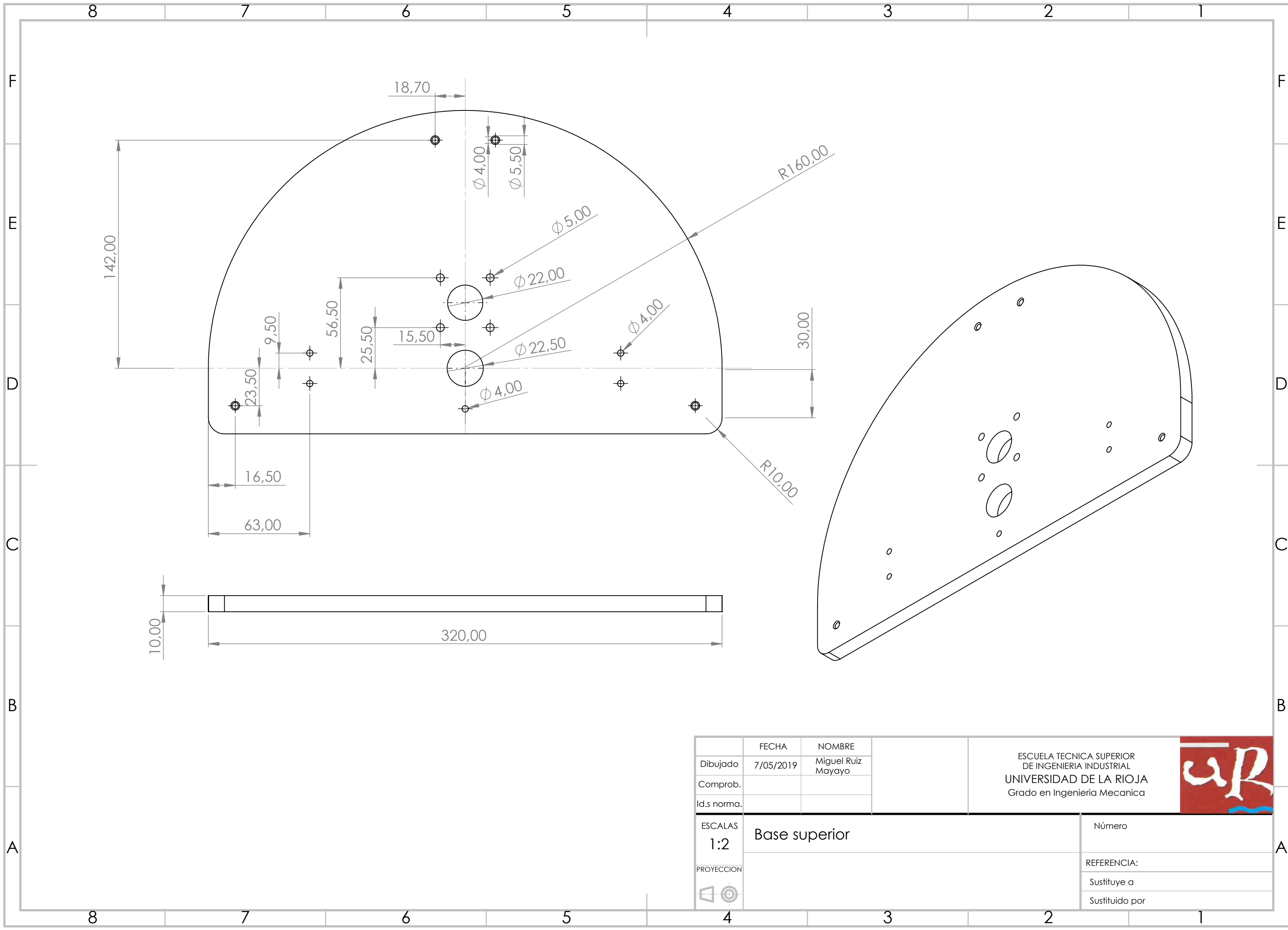
RESUMEN PRESUPUESTO	
Piezas impresas	37,9
Tornillería y otros	15
Componentes y electrónica	367,66
<b>TOTAL</b>	<b>420,56</b>



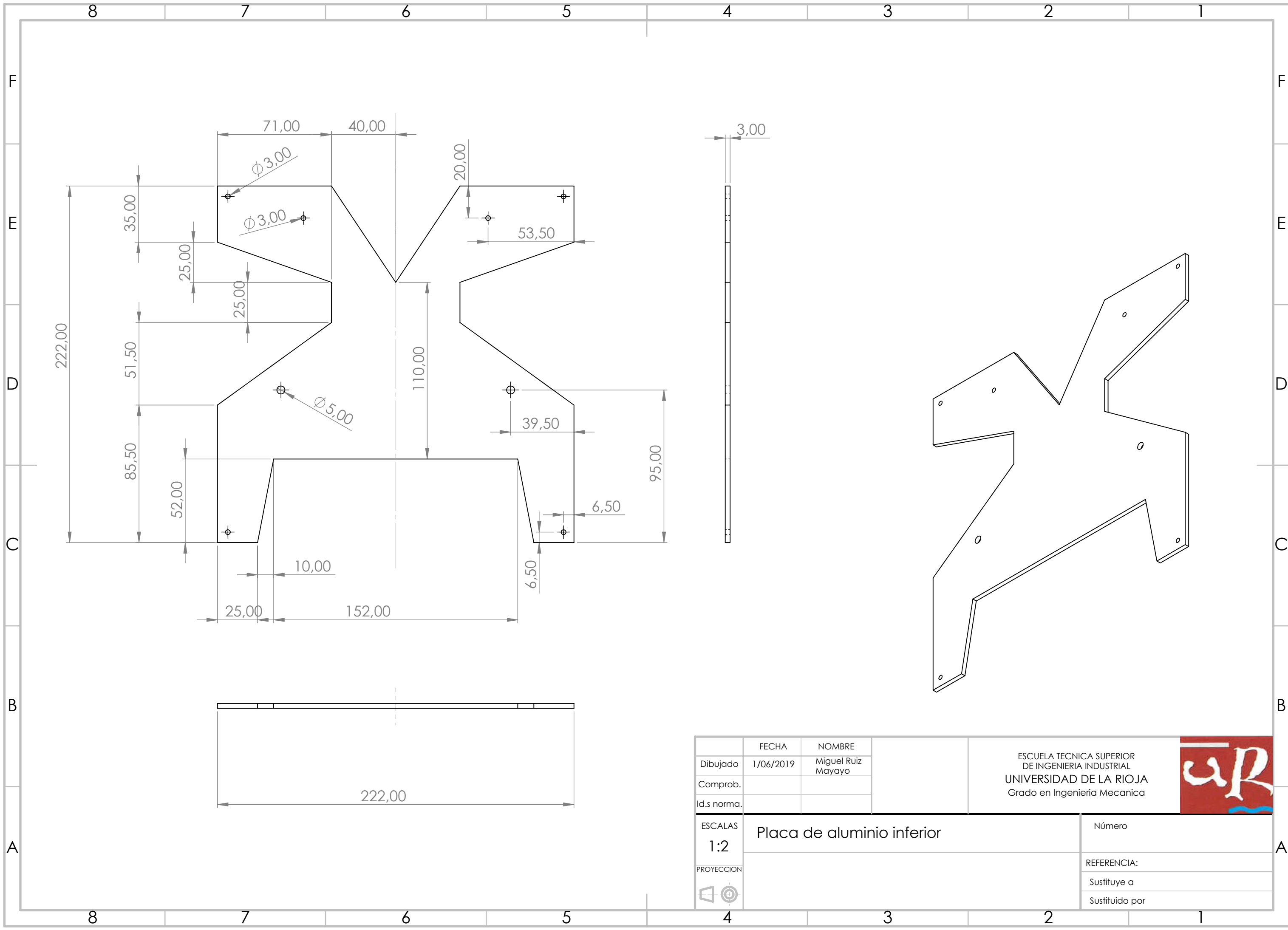
## ANEXO C: Planos

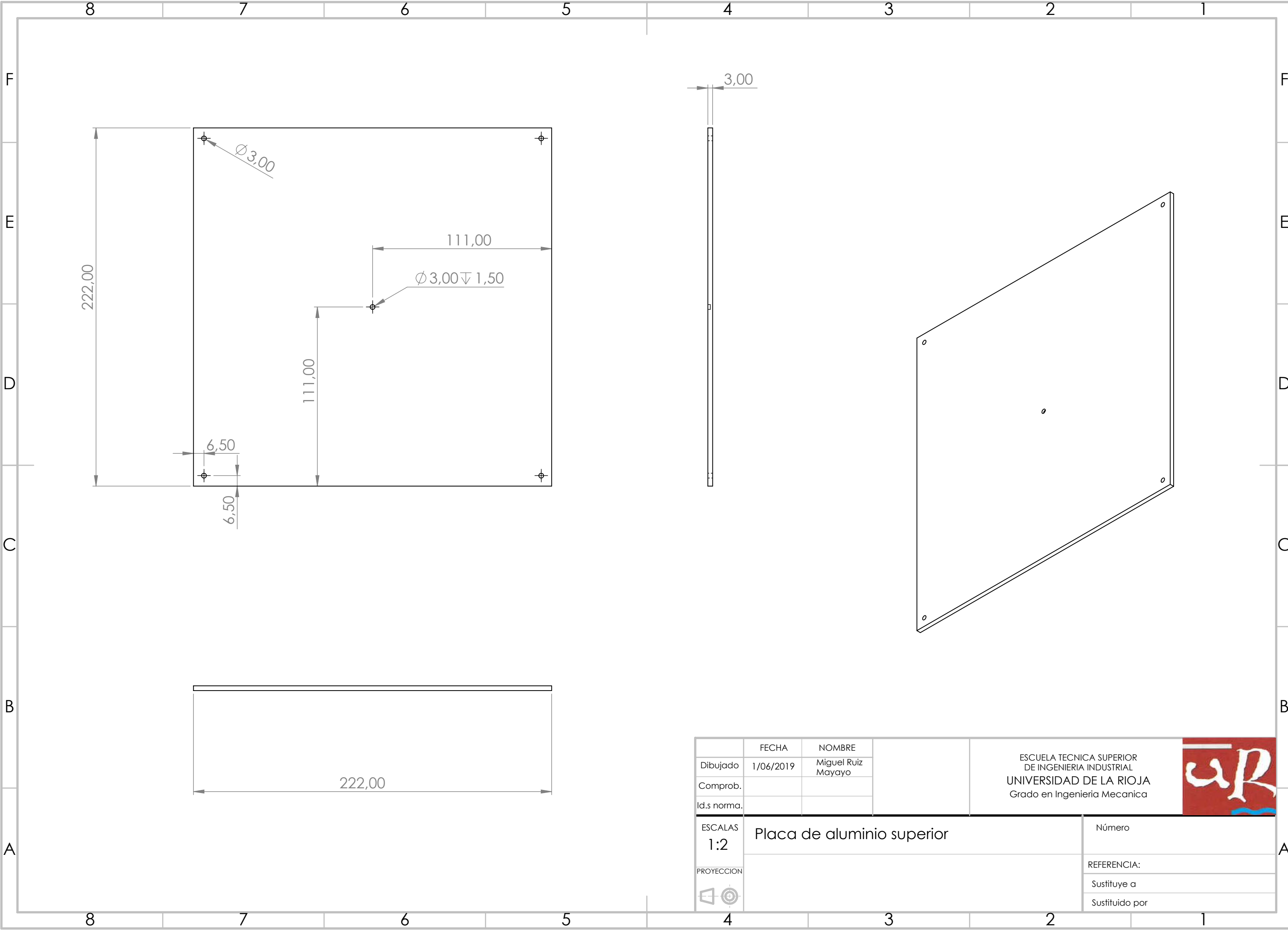




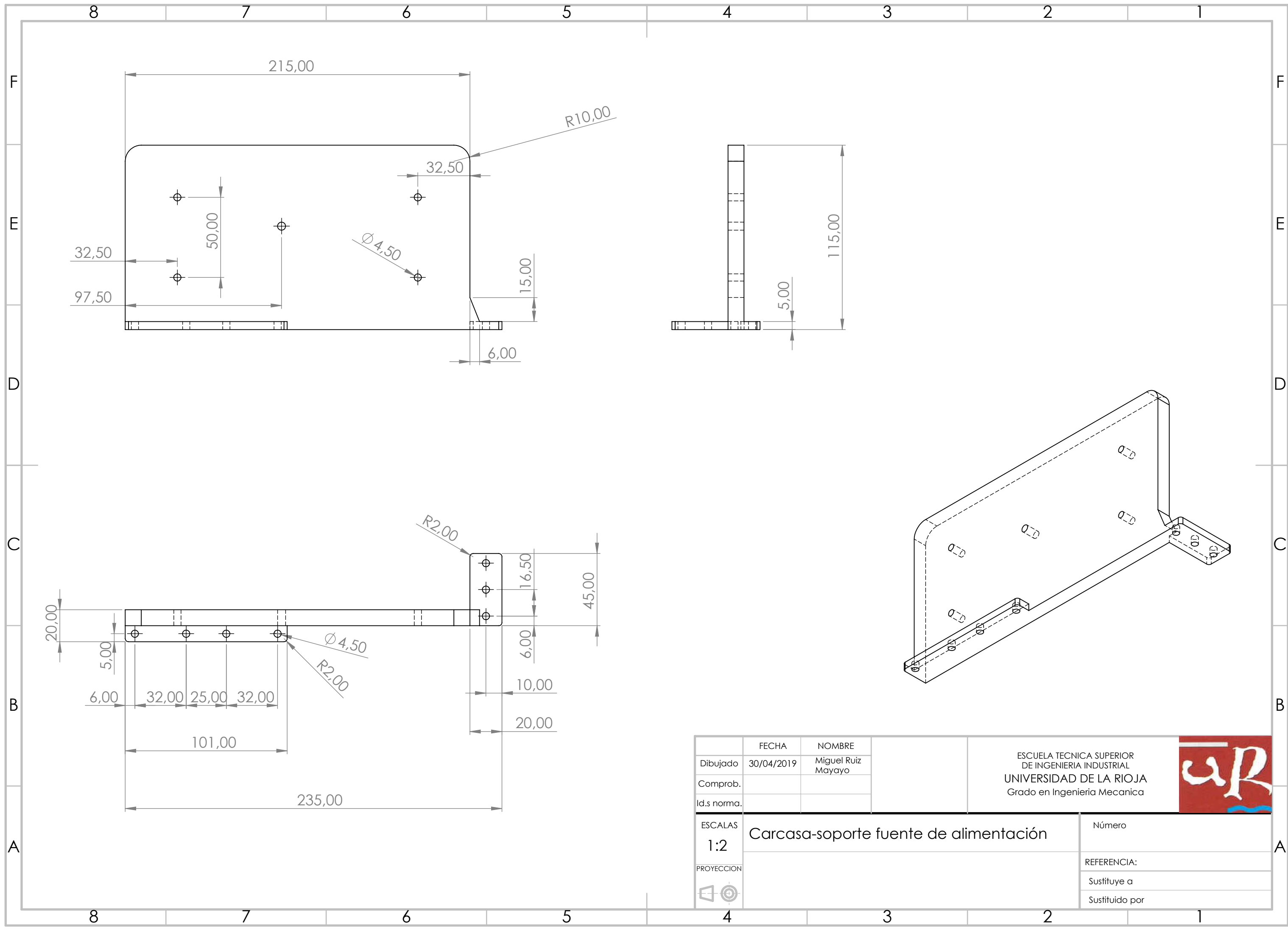


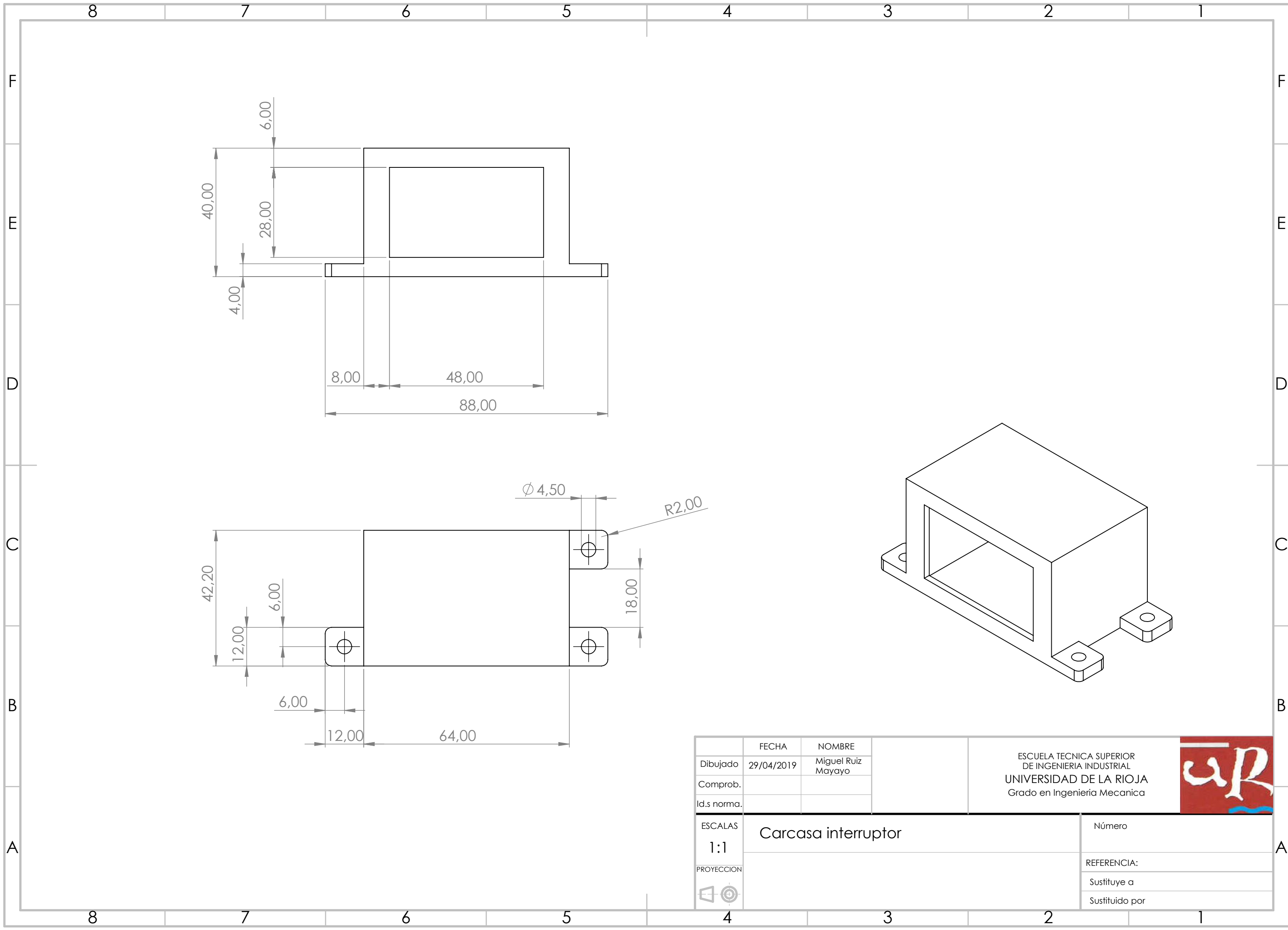


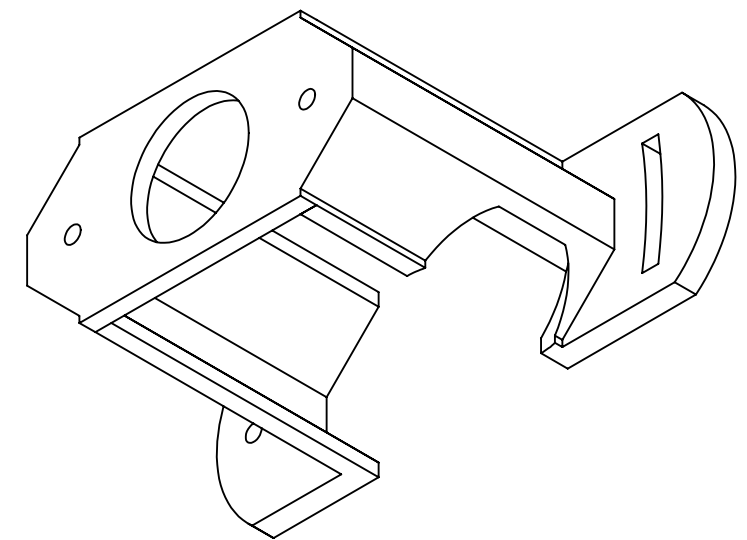
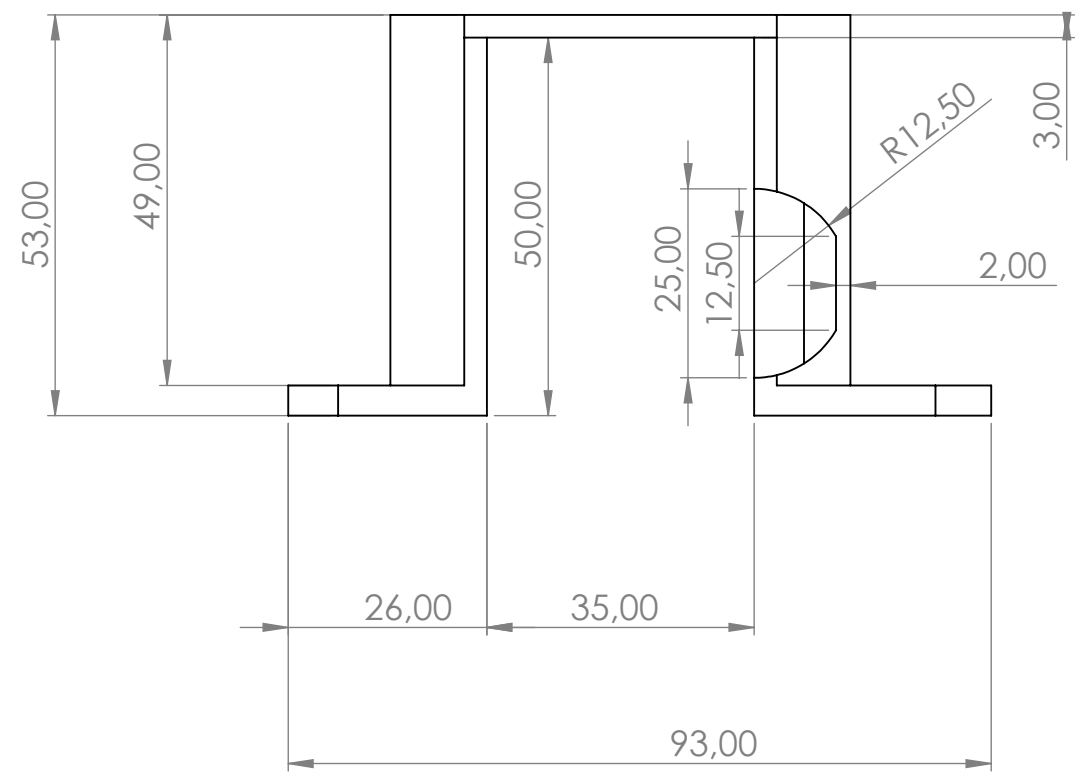
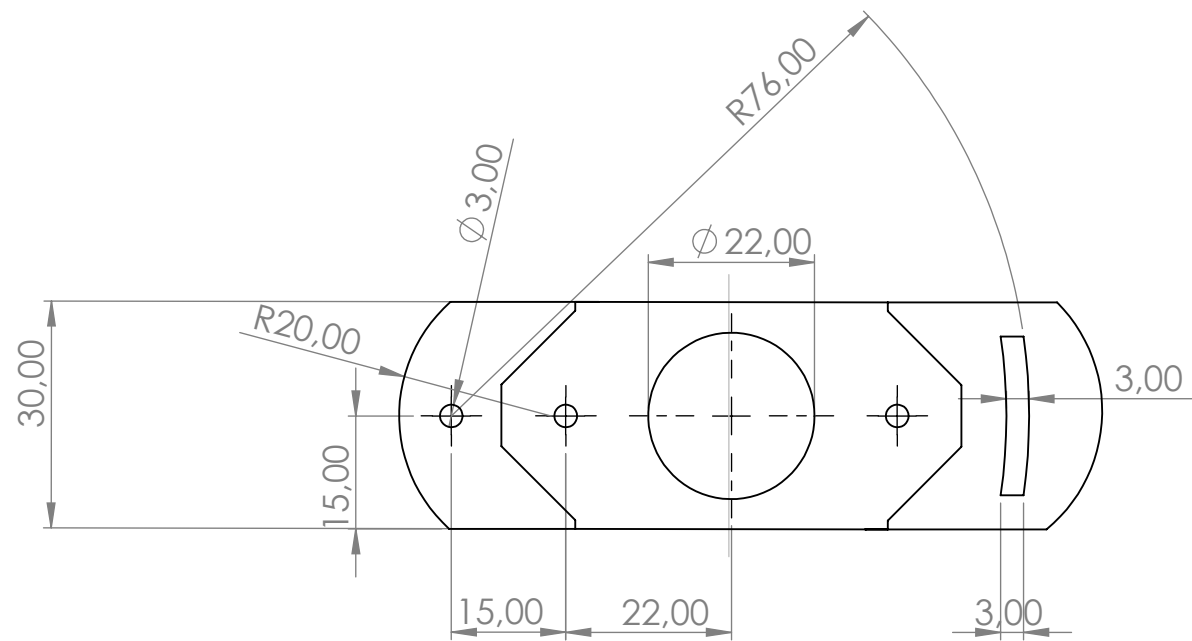






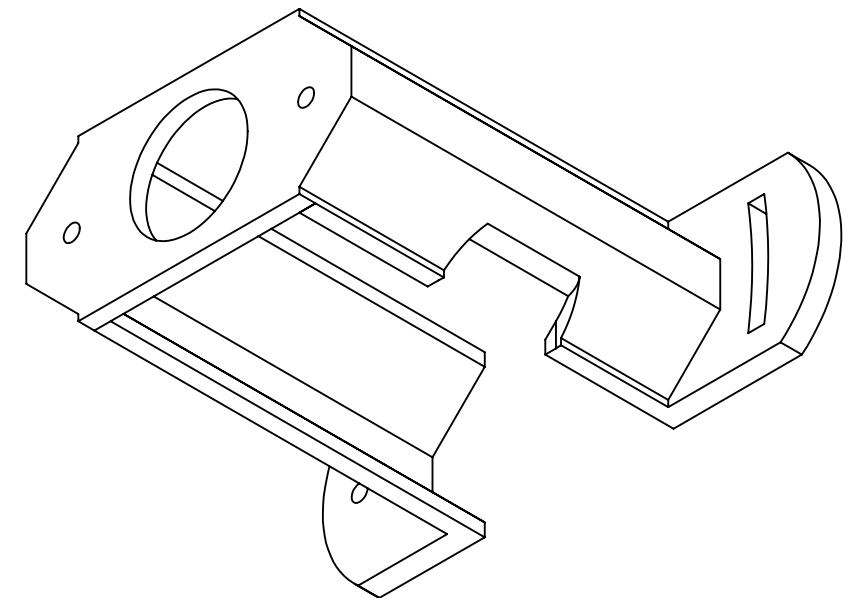
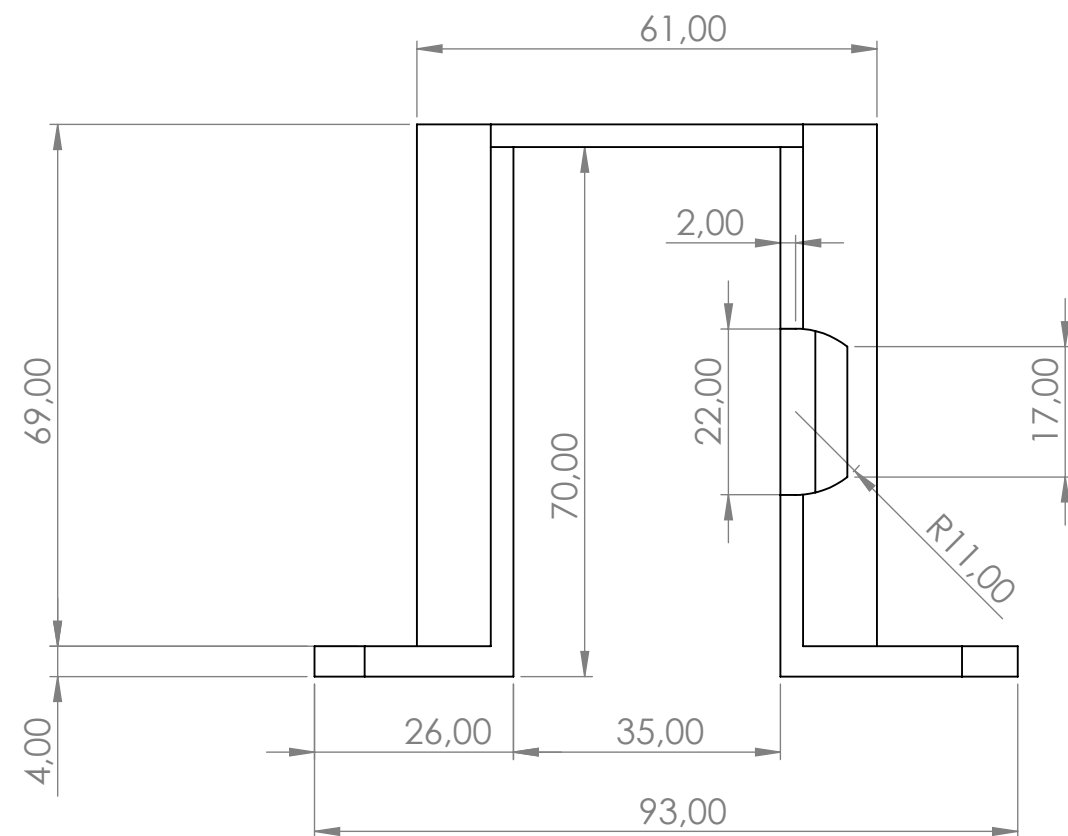
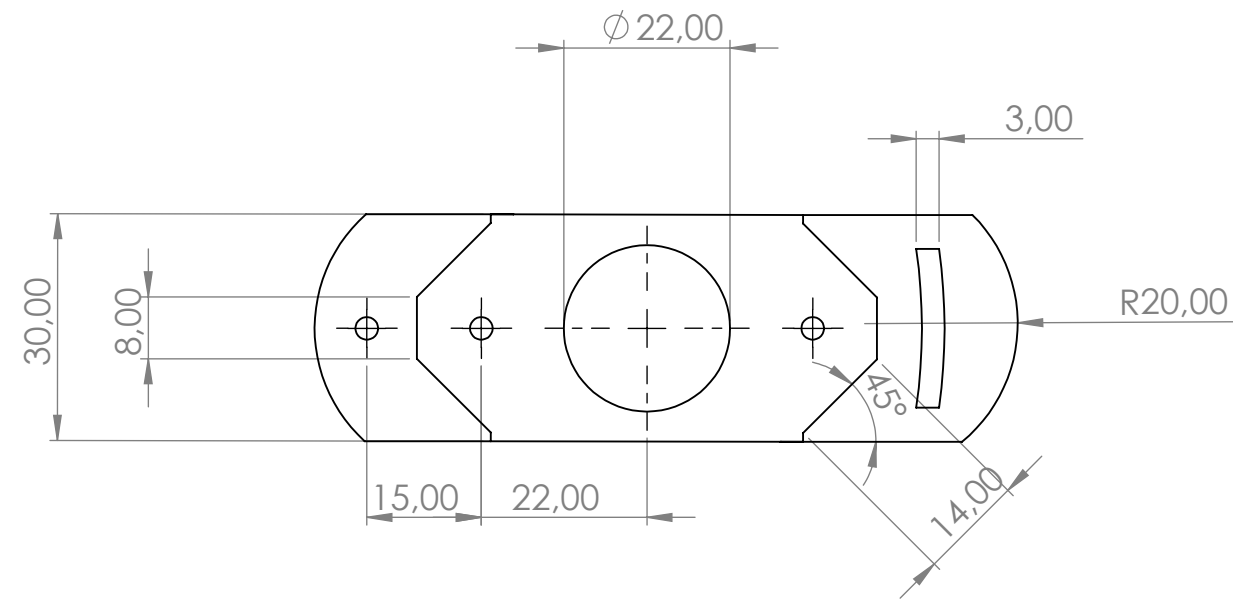
	FECHA	NOMBRE	<div>ESCUOLA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingenieria Mecanica</div> 	
Dibujado	1/06/2019	Miguel Ruiz Mayayo		
Comprob.				
Id.s norma.				
ESCALAS 1:2	Placa de aluminio superior			Número
PROYECCION				REFERENCIA:
				Sustituye a
				Sustituido por







	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	1/07/2019	Miguel Ruiz Mayayo			
Comprob.					
Id.s norma.					
ESCALAS	Soporte motor bajo			Número	
1:1					
PROYECCION				REFERENCIA:	
				Sustituye a	
				Sustituido por	



	FECHA	NOMBRE		ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERIA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE LA RIOJA Grado en Ingeniería Mecánica	
Dibujado	1/05/2019	Miguel Ruiz Mayayo			
Comprob.					
Id.s norma.					
ESCALAS	Soporte motor alto			Número	
1:1					
PROYECCION				REFERENCIA:	
				Sustituye a	
				Sustituido por	